



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

RIKU VIRTANEN

RTK-GPS LENTÄVÄSSÄ KUVAUSALUSTASSA JA KOORDI-
NAATTIEN MÄÄRITTÄMINEN KUVASTA

Diplomityö

Tarkastajat: professori Risto Ritala
ja tutkijatohtori Jussi Collin
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 15. elokuu-
ta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Signaalinkäsittelyn ja tietoliikennetekniikan koulutusohjelma

VIRTANEN, RIKU: RTK-GPS lentävässä kuvausalueesta ja koordinaattien määrittäminen kuvasta

Diplomityö, 82 sivua, 6 liitesivua

Joulukuu 2012

Pääaine: Paikannus ja navigointi

Tarkastajat: professori Risto Ritala ja tutkijatohtori Jussi Collin

Avainsanat: UAV, GPS, RTK, Kuvamittaus, Pääkomponenttianalyysi

Kiinnostus älykkäiden ja autonomisten työkonoiden käyttämisestä teollisuudessa on kasvanut vuosi vuodelta. Antureiden ja laskentakapasiteetin edullistuminen ovat osaltaan mahdollistaneet eri mittalaitteiden integroimisen erilaisiin koneisiin, roboteihin. Robottien liikkuminen vaatii reittisuunnittelua. Reittisuunnitelmaa voidaan parantaa lisäinformaatiolla jota robotit voivat keskenään välittää toisilleen.

Tämän diplomityön tavoitteena on ollut löytää menetelmä, jolla kameralla varustettu pieni lentävä kuvausalue pystyy löytämään maasta kohteen ja määrittämään kohteelle karttakoordinaatit. Kohde voi olla asia, joka maastosta pitää löytää tai este, jota pitää välttää. Karttakoordinaatit voidaan välittää maassa toimivalle robotille, joka huomioi kohteen koordinaatit omassa reittisuunnittelussaan.

Suurimmat haasteet diplomityössä olivat riittävään tarkkuuteen kykenevän GPS-vastaanottimen löytäminen ja sopivan antennin löytäminen. Työssä huomattiin eri antennilla olevan suuriakin suorituskykyeroja. Rajoittava tekijä vastaanottimen ja antennin valinnassa oli paino, joka piti säilyttää mahdollisimman pienenä lentävän kuvausalueen rajallisen nostokyvyn takia. Haastavaa oli myös toimivan kuvamittausmenetelmän löytäminen, sekä mittauksen synkronointi.

Työ suoritettiin testaamalla ensin sopivimpia GPS-antenneja maassa kulkevan robotin avulla. Sopivin antenni asennettiin testeissä kuvausalueena toimineeseen heksakopteriin. Kohde, jolle koordinaatit määritetään, valittiin selkeästi maastosta erottuvaksi ja sen mittaamiseen käytettiin pääkomponenttianalyysi-menetelmää. Käytetyllä kameralla tehtiin ensin referenssimittauksia kohteen etäisyyden määrittämiseksi kuvasta, jonka jälkeen referenssiä käytettiin käytännön mittauksen analysoinnissa. Saaduista mittauksista laskettiin kohteelle koordinaatit suhteessa kuvausalueen sijaintiin.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Information Technology

VIRTANEN, RIKU: RTK-GPS on a UAV Platform: Determining Coordinates from an Image

Master of Science Thesis, 82 pages, 6 Appendix pages

December 2012

Major: Positioning and navigation

Examiners: Professor Risto Ritala and Research fellow Jussi Collin

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, Global Positioning System, Real Time Kinematic, Image based measuring, Principal Component Analysis

Inexpensive sensors and computing power have been one of the reasons for the growing interest of autonomous and intelligent machines. Integration and fusion of different sensors can create environment-sensing robots. Often robots that move in the environment require some sort of route planning. This planning can be enhanced by exchange of information between robots nearby.

The goal of this thesis is to find a method of determining coordinates for a recognized target in image from an unmanned aerial vehicle platform. This target can be something to be found or something to be avoided. Target's coordinates can be passed to robots moving on the ground which can then improve their route planning.

Main challenges during the study were to find a light weight GPS receiver and antenna combination for the UAV platform that would provide enough accuracy. Performance differences between antennas were found. A trade-off between antenna performance and antenna weight had to be made because of the limited lifting capacity. Another challenge was also to find a usable image-based measurement method and the synchronization of all needed measurements.

The study was carried out by first testing out different GPS antennas with a robot moving on the ground. Best antenna was selected to the hexacopter used as the UAV platform. Target was chosen to be clearly visible from the ground and a principal component analysis method was used for the measurements. Reference measurements were made in advance to be used with the actual measurements. After combining all measurement data, the relative position of the target was computed from the position of the UAV platform.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Systeemitekniikan laitoksella osana FAMOUS-projektia, jonka tavoitteena on kehittää autonomisia työkohteita tulevaisuuden työmaalle. Työn ohjaajina ja tarkastajina ovat toimineet professori Risto Ritala ja tutkijatohtori Jussi Collin. Lisäksi työtä on kuvamittausten osalta ohjannut laboratorioinsinööri Heimo Ihalainen. Martti Kirkko-Jaakkola on auttanut tulkitsemaan testien tuloksia, sekä tarjosi mahdollisuuden TTY:n Tietokonetekniikan laitoksen laitteiden testaamiseen.

Haluan kiittää työn tarkastajaa, professori Risto Ritalaa, ohjaavista neuvoista työn suunnittelun ja kirjoitusasun suhteen. Lisäksi haluan kiittää työpariani Joonas Meliniä, jonka kanssa on ollut antoisaa vaihtaa näkemyksiä testien lomassa.

Lopuksi haluan kiittää vanhempiani Kirsiä ja Atia, sekä isoveljeäni Jannea kaikesta siitä tuesta, kannustuksesta ja ohjauksesta jota olen heiltä opiskeluvuosieni varrella saanut. Kiitos kuuluu myös rakkaalle kihlatulleni, tulevalle vaimolleni Marikalle, joka on joustanut ja kestänyt teekkarielämäni.

Tampereella 21.12.2012

Riku Virtanen
Rauninkatu 1 B 6
33560 Tampere
0503260998
riku.virtanen@tut.fi

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Satelliittipaikannusjärjestelmät	3
2.1	Satelliittinavigoinnin historia	3
2.2	Satelliittipaikannusjärjestelmän eri segmentit	4
2.3	Toimintaperiaate	4
2.4	GPS	6
2.4.1	GPS palvelut ja taajuudet.....	6
2.4.2	GPS navigointiviesti	8
2.4.3	Nykyhetki ja tulevaisuus.....	9
2.5	Muita satelliittinavigointijärjestelmiä	10
2.5.1	Glonass	10
2.5.2	Galileo.....	11
2.5.3	Compass.....	11
2.5.4	Quasi-Zenith Satellite System	11
2.6	Vastaanottimen toiminta	12
2.7	Mittausmallit	15
2.7.1	Pseudoetäisyysmittaus	16
2.7.2	Kantaaallon vaihemittaus	16
2.7.3	Sijainnin ratkaiseminen pseudoetäisyyden avulla	16
2.8	Virhelähteet.....	18
2.8.1	Satelliitista johtuvat virheet	18
2.8.2	Signaalitien virheet	19
2.8.3	Vastaanottimesta ja antennista johtuvat virheet	21
2.8.4	Satelliittien suhteellinen geometria.....	21
3	Kantaaaltomittaukseen perustuva paikannus	26
3.1	Toimintaperiaate: yksinkertainen malli.....	26
3.2	Kantaaaltomittaus useammasta satelliitista.....	29
3.3	Häiriöiden eliminointi	31
3.3.1	Yksittäisdifferenssi	31
3.3.2	Kaksoisdifferenssi ja vaihekatko	32
3.4	Kaksitaajuusmittaus	32
4	Kohteen valinta ja kuvamittaus.....	34
4.1	Kohde	34
4.2	Pääkomponenttianalyysi, gradientti ja sovitus.....	35
4.3	Virheiden arviointi	41
4.4	Koordinaattien määrittäminen kohteelle.....	43
5	Testilaitteet ja ohjelmisto	46
5.1	Maarobotti.....	46
5.2	Heksakopteri	47
5.3	RTKLIB-ohjelmisto	50

5.4	Vastaanottimet ja antennit.....	50
5.4.1	Yuan10 GPS-vastaanotin.....	50
5.4.2	GPS-antenni V.Torch VTGPSIA-3	51
5.4.3	GPS-antenni U-blox ANN-MS	51
5.4.4	GPS-antenni NovAtel GPS-702-GG	52
5.5	Kamera	53
6	Mittaustuloksia.....	54
6.1	Käytettävien antennien valinta.....	54
6.2	NovaTel ja U-blox antennit RTK-mittauksissa.....	55
6.3	Vastaanottimen kohinan määrittäminen.....	59
6.4	Kohteen koordinaattien tarkkuus	61
7	Yhteenveto	66
	Lähteet.....	67

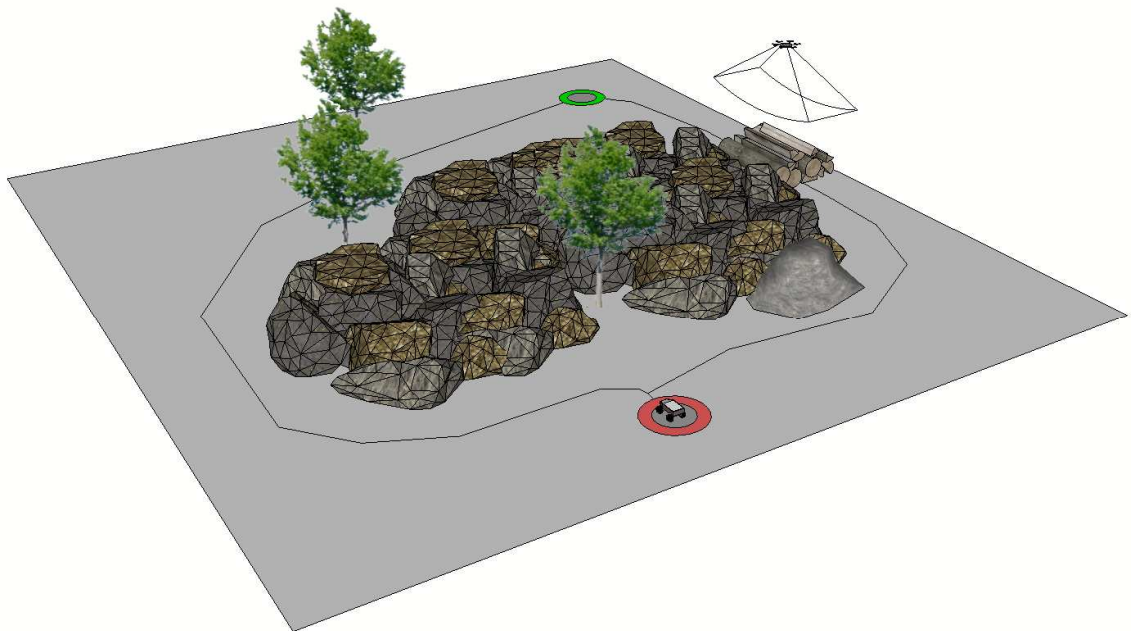
Termit ja niiden määritelmät

BPSK	Binary Phase-Shift Keying
C/A	Coarse/Acquisition code
C/N0	Carrier-to-Noise ratio
CDMA	Code Division Multiple Access
DGPS	Differentiaali-GPS
DOP	Dilution of Precision
ENU	East-North-Up
FDMA	Frequency Division Multiple Access
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GEO	Geostationary Earth Orbit
Glonass	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
IOV	In Orbit Validation
LAMBDA	Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
P(Y)	Precision code
PCA	Principal Component Analysis
PDOP	Position Dilution of Precision
PLL	Phase-locked-loop
PPS	Precise Positioning Service
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RF	Radio Frequency
RGB	Red-Green-Blue
ROS	Robot Operating System
RTK	Real Time Kinematic
SA	Selective Availability
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SMA	Sub Miniature version A
SPS	Standard Positioning Service
TDOP	Time Dilution of Precision
TEC	Total Electron Count
TOA	Time-Of-Arrival
USB	Universal Serial Bus
VDOP	Vertical Dilution of Precision

1 JOHDANTO

Pienet miehittämättömät lentoalukset kuvausaluksina ovat yleistyneet viime vuosina voimakkaasti. Samaan aikaan on syntynyt kiinnostusta autonomisia koneita kohtaan muun muassa etsintä ja pelastustehtävissä. (Tomić et al. 2012) Autonomisten koneiden kyky havainnoida ympäristöä ja reagoida ympäristöön on hyvin olennaista esimerkiksi koneen toimintaympäristössä olevien työntekijöiden työturvallisuuden kannalta.

Tämä diplomityö liittyy projektiin, jonka tähtäimenä on kehittää autonomisia liikkuvia koneita. Projektin tavoitteena on saada koneet tukemaan toisiaan vaihtamalla keskenään tietoa. Lentävä kuvausaluksista voi toimia esimerkiksi havainnoijana maan pinnalla liikkuville koneille ja tuottaa näin lisäinformaatiota ympäristöstä. Kuvassa 1.1 on hahmoteltu maassa etenevän robotin ja lentoaluksen (heksakopterin) yhteistyötä.



Kuva 1.1 Heksakopteri kuvaa ja välittää tiedon mahdollisten esteiden sijainneista reittiä suunnittelevalle maarobotille.

Kuvan tilanteessa maarobotilla on tiedossaan kartta ympäröivästä maastosta, mutta ei välttämättä tietoa suunnitellulle reitille tulleista esteistä. Tällöin maarobotti voi lähettää heksakopterin tarkistamaan reitin kuljettavuuden. Heksakopterin tuottaman informaation avulla voidaan parantaa maarobotin suorituskykyä annetulla siirtymätehtävällä.

Diplomityön tavoitteena on määrittää RTK-GPS-järjestelmän tuottaman tarkan paikkatiedon avulla kuvasta tunnistetun kohteen sijaintikoordinaatit. Kohde tunnistetaan yksinkertaisella kuva-analyysin algoritmilla. Tässä työssä kohde on valittu helposti tunnistettavaksi ja mitattavaksi. Kuvasta tunnistetun kohteen etäisyys ja suunta määrite-

tään, minkä jälkeen sen koordinaatit lasketaan suhteessa kuvasalustan paikkatietoon. Kohteen sijaintikoordinaatit voidaan tämän jälkeen välittää esimerkiksi toiselle robotille, kuten edellä mainitulle maarobotille. Vaihtoehtoisesti jos kohteen sijainti tunnetaan, kuvasalustan paikkaestimaattia voidaan korjata sijainnin avulla.

Työssä esitellään ensin satelliittipaikannuksen teoriaa, termejä ja mittausten toimintaperiaatteita, sekä virhelähteitä. Tämän jälkeen esitellään reaaliaikainen vaihemittaukseen perustuva suhteellinen paikannusmenetelmä. Tämän jälkeen käsitellään diplomityön toista osuutta: kuvankäsittelyä ja kuvamittausta. Kuvista pyritään löytämään haluttu kohde ja mittaamaan sen etäisyys kuvasalustasta. Lisäksi esitellään virhelähteet, jotka vaikuttavat kohteen sijaintiestimaatin tarkkuuteen. Lopuksi esitellään työssä käytetyt laitteet ja ohjelmistot sekä mittaustulokset ja yhteenveto.

2 SATELLIITTIPAIKANNUSJÄRJESTELMÄT

Global Navigation Satellite System (GNSS) on yleisnimi satelliittipaikannusjärjestelmälle. Satelliittipaikannuksessa maata kiertävät satelliitit lähettävät signaalia, joka mitataan maan pinnalla olevalla vastaanottimella. Tässä luvussa esitellään diplomityön kannalta oleellinen tieto GNSS-järjestelmien historiasta, toimintaperiaatteesta ja tämän hetken tilanteesta.

2.1 Satelliittinavigoinnin historia

Alan kirjallisuus (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle 2008, Misra, Enge 2006) katsoo satelliittipaikannuksen kehityksen alkaneen vuonna 1957, kun Venäjä laukaisi Sputnik satelliitin maata kiertävälle radalle. Sputnikin lähettämästä radiosignaalista pystyttiin mittaamaan taajuussiirtymä ja sen muutos satelliitin edetessä.

Misran ja Engen (Misra, Enge 2006) mukaan ensimmäinen havainto taajuussiirtymää mitattaessa oli, että jos yksittäisen vastaanottimen sijainti maassa tiedetään, taajuussiirtymistä pystytään päättämään satelliitin sijainti kiertoradalla. Tästä seurasi päätelmä, että jos satelliitin kiertorata tiedettäisiin jatkuvasti, vastaanotin voi ratkaista oman sijaintinsa missä tahansa maapallolla. Tämä johti Yhdysvaltojen ensimmäiseen satelliittinavigointi ohjelmaan, jonka nimi oli Navy Navigation Satellite System, mutta tuli paremmin tunnetuksi nimellä Transit. Transit-ohjelmaan oli tarve, koska Yhdysvaltojen siihen aikaan uudet sukellusveneet tarvitsivat kipeästi uutta paikannusjärjestelmää. Transit otettiin käyttöön vuonna 1964. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle 2008)

Transit järjestelmä koostui seitsemästä LEO-satelliitista (eng. Low Earth Orbit), jotka kiersivät 1100 kilometrin korkeudessa. Paikannus perustui taajuussiirtymään 150 MHz ja 400 MHz taajuuksilla. Lähestyvän satelliitin signaalin taajuus nousi vähitellen ja taajuuden ollessa maksimissaan satelliitti oli lähimmillään, jonka jälkeen taajuus alkoi laskea. Taajuuden muutosnopeus lakipisteessä määrittä vastaanottimen etäisyyden satelliitin kulkemaan rataa. LEO-satelliitit ovat käyttäjille näkyvissä vain n. 10–20 minuuttia ja Transit-satelliitteja oli käyttäjälle näkyvissä vain yksi kerrallaan. Kaksitaajuus-mittauksella pystyttiin myös mittaamaan ionosfäärin aiheuttamia virheitä ja järjestelmällä päästiin 25 metrin paikannustarkkuuteen. Transit järjestelmä toimi hyvin tasaisella ja tunnetulla nopeudella kulkeville laivoille, jotka eivät tarvinneet jatkuvaa paikannusta. Samoin sukellusveneet pystyivät Transit-järjestelmän avulla kalibroimaan inertia-navigointilaitteensa. Järjestelmän selkeä puute oli, että se ei ollut jatkuvasti saatavilla eikä se sen takia sopinut lentokoneille ja mobiileille henkilökäyttäjille. (Misra, Enge 2006)

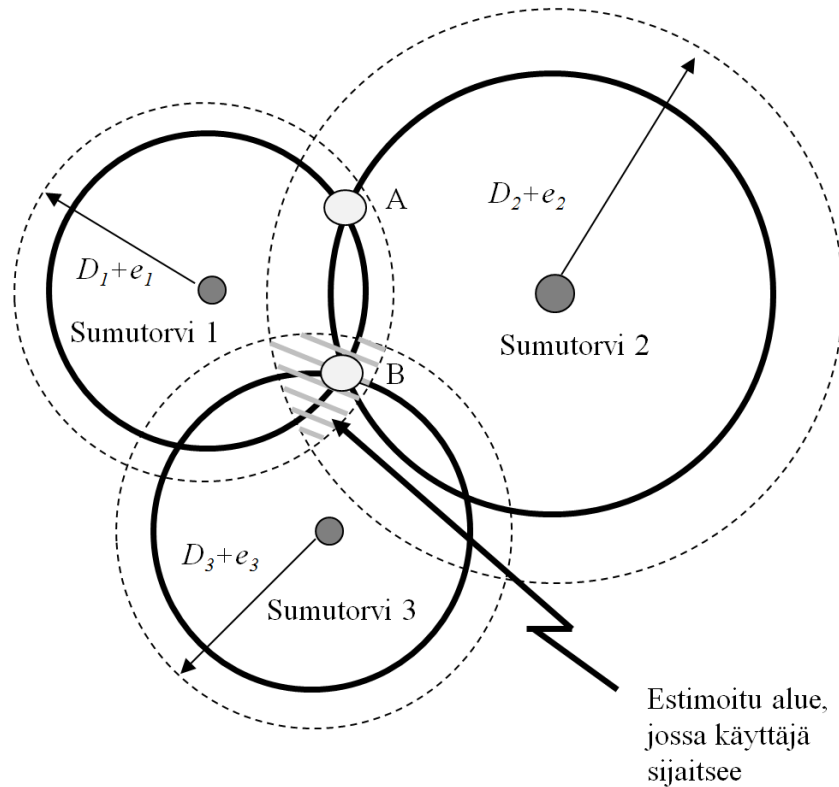
Yhdysvaltojen laivastolla ja ilmavoimilla oli erilliset jatkohankkeensa 1960-luvun lopulla paremman satelliittipaikannusjärjestelmän kehittämiseksi. Nämä hankkeet yhdistettiin yhdeksi, josta lopulta syntyi Global Positioning System (GPS). Suunnitelmien yhteensaattamiseksi jouduttiin tekemään valintoja ja kompromisseja. Näitä olivat muun muassa tulisiko järjestelmän olla aktiivinen vai passiivinen, mikä olisi käytettävä paikannusmenetelmän, käytetyn signaalin taajuus ja muoto, sekä satelliittien korkeuden ja määrän valinta. GPS-järjestelmä ilmoitettiin toimintakuntoiseksi vuonna 1995 ja Transit poistettiin käytöstä vuonna 1996. (Misra, Enge 2006)

2.2 Satelliittipaikannusjärjestelmän eri segmentit

GNSS-järjestelmät koostuvat kolmesta segmentistä: avaruus-, kontrolli- ja käyttäjäsegmentistä. Avaruussegmentti koostuu maata kiertävistä satelliiteista, joiden kiertoradat on valittu tarkkaan. Kiertoratojen valinnassa otetaan huomioon mm. käyttäjien vaatimus paikannustarkkuudelle, satelliittien saatavuus, palvelun kattavuus sekä satelliittien ja käyttäjän välinen geometria. Kontrollisegmentti valvoo ja ohjaa GNSS-järjestelmää sekä päivittää satelliittien korjausparametreja, jotka välitetään käyttäjille. Kontrollisegmentti koostuu pääasemasta, sekä ympäri maapalloa olevista tiedonsiirto- ja seuranta-antenneista joiden avulla uudet parametrit siirretään satelliitteihin ja seurataan satelliittien kiertoratoja. Käyttäjäsegmentti muodostuu GNSS-järjestelmän loppukäyttäjistä, jotka voivat olla siviilikäyttäjiiä tai sotilaskäyttäjiiä. Siviilikäyttäjät eivät pääse käyttämään kaikkia GNSS-järjestelmän tarjoamia paikannussignaaleja. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle 2008)

2.3 Toimintaperiaate

Nykyaikaiset satelliittipaikannusjärjestelmät perustuvat trilateraatio-menetelmään, josta käytetään radionavigoinnissa nimitystä time-of-arrival (TOA) (Misra, Enge 2006). Menetelmä perustuu siihen, että signaalin etenemisnopeus tiedetään. Kun vastaanotin ja lähetin on synkronoitu samaan aikaan, vastaanotin mittaa signaalin vastaanottoajan, josta voidaan laskea signaalin kulkuaika. Kun signaalin etenemisnopeus tunnetaan, voidaan signaalin kulkema matka laskea. Kuvassa 2.1 on klassinen esimerkki kaksiulotteisesta paikannuksesta, jossa lähettiminä toimivat sumutorvet.



Kuva 2.1 Esimerkki paikannuksesta TOA-menetelmän avulla.

Kuvassa suure D on välimatka sumuttorven ja vastaanottajan välillä. Suure e kuvaa mittausepävarmuutta. A ja B ovat esimerkkejä paikkaratkaisuisista. Esimerkkitilanteessa oletetaan, että kaikkien sumuttorvien ja käyttäjän kello on synkronoitu keskenään. Lisäksi tiedetään signaalin etenemisnopeus ja lähetysaika. Ennalta on voitu sopia, että sumuttorvet lähettävät äänen aina klo 12.00 hieman eri äänentaajuudella. Tällöin vastaanottaja voi mitata vastaanottoajan ja selvittää matkan sumuttorvelle. Kuvasta nähdään myös, että jos sumuttorvia olisi vain yksi, käyttäjä paikantuisi sumuttorven ympyrän kehälle. Kahdella sumuttorvella paikannutaan kahden ympyrän kehälle, jolloin ratkaisuvaihtoehtoja jää ympyröiden leikkauskohdat A ja B. Kolmannen sumuttorven avulla saadaan mitattua yksikäsitteinen paikkaratkaisu, tässä tapauksessa B. Mittaukset eivät koskaan täysin tuota yksittäistä sijaintipistettä vaan estimaatin alueesta, jolla käyttäjä sijaitsee. Tämän alueen suuruus riippuu siitä, kuinka tarkasti etäisyydet sumuttorviin on saatu mitattua. Mittauksen tarkkuuteen vaikuttavat esimerkkitilanteessa lähetysaika, vastaanottoaika, kellosynkronisuuden ja äänen nopeuden tarkkuus. Satelliittipaikannuksessa näille epätarkkuuksille löytyy vastineet, joita pyritään korjaamaan.

GNSS-järjestelmät toimivat muuten samalla periaatteella, mutta paikannus tapahtuu kolmi-ulotteisesti, esimerkin ympyrät ovat palloja, ja paikannukseen tarvitaan kolmen satelliitin sijasta neljä satelliittia. Ilman virheitä nämä neljä etäisyysmittausta voidaan yksinkertaistettuna määritellä Pythagoraan lauseella seuraavasti

$$\begin{aligned}
D_1 &= \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} + c\tau - c\tau_1 \\
D_2 &= \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} + c\tau - c\tau_2 \\
D_3 &= \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} + c\tau - c\tau_3 \\
D_4 &= \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2} + c\tau - c\tau_4
\end{aligned} \tag{2.1}$$

D on etäisyys satelliitin ja vastaanottimen välillä, (x, y, z) on vastaanottimen sijainti, (x_n, y_n, z_n) on satelliitin sijainti, c on valonnopeus, τ on vastaanottimen suhteellinen aikasiirtymä (kellobias) ja τ_n on satelliitin kellobias. Satelliittien sijainnit ja kellobias tunnetaan ennalta, joten yhtälöistä jää ratkaistavaksi vastaanottimen sijainti (x, y, z) ja vastaanottimen kellobias τ . Vastaanottimen kellobias vaikuttaa kaikkiin etäisyysmittauksiin yhtä paljon. Neljännen satelliitin avulla vastaanottimen kellobias saadaan estimoitua ja sen vaikutus eliminoidua. (Blewitt 1997)

Neljä on välttämätön määrä satelliitteja, mutta ei aina riittävä. Jos kaksi satelliittia on ”line of sight” akselilla, eli näköakselilla, tai jos kaikki satelliitit ovat samassa tasossa, neljä satelliittia ei riitä paikantamiseen. Lähes kaikissa käytännön sovelluksissa tarvitaan vähintään viisi satelliittia. Vaihtoehtoisesti voidaan jättää myös yksi estimoitava parametri pois. Esimerkiksi laivan korkeuskoordinaatti voitaisiin olettaa vedenpinnan tasoon. (Blewitt 1997)

2.4 GPS

GPS on Yhdysvaltojen puolustusministeriön hallinnoima ja ensimmäinen nykyaikainen satelliittinavigointijärjestelmä. Se ilmoitettiin toimivaksi vuonna 1995 ja koostui alun perin 24:stä MEO-radan (Medium Earth Orbit) satelliitista, jotka kiertävät maata n. 20200 kilometrin korkeudella. GPS-satelliittien kiertoradat ovat 55 asteen kulmassa (inklinaatiokulma) maapallon isoympyrään nähden. Jokaisella kiertoradalla on 4 epätasavälisesti sijoitettua satelliittia. Vuonna 1999 GPS-järjestelmälle julkistettiin GPS-järjestelmän modernisointiohjelma. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle 2008)

GPS-järjestelmän ylläpidosta vastaa Yhdysvaltojen ilmavoimat. Uusia paikannussignaaleja lähettäviä satelliitteja on lähetetty korvaamaan ikääntyneitä satelliitteja. Alkuperäisessä satelliittikonstellaatiossa oli 6 kiertorataa, joilla jokaisella oli 4 satelliittipaikkaa. Vuonna 2011 modernisointiin liittyi satelliittikonstellaation muokkaaminen siten, että kiertoratoja muuttamalla konstellaation satelliittimäärä nostettiin 27:ään satelliittiin. Aktiivisia GPS-satelliitteja on tällä hetkellä 31, jonka lisäksi kiertoradoilla on 3-4 käytöstä poistettua satelliittia, jotka voidaan aktivoida tarvittaessa. (National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing 2012)

2.4.1 GPS palvelut ja taajuudet

GPS tarjoaa kahta paikannuspalvelua: SPS-palvelua (eng. Standard Positioning Service), joka on tarkoitettu siviilikäyttäjille, ja PPS-palvelua (eng. Precise Positioning Service), joka on tarkempi mutta suojattu siten, että vain Yhdysvaltojen armeija ja muut valtuutetut käyttäjät pääsevät käyttämään sitä. Yhdysvaltojen ilmavoimat voi halutes-

saan lisätä tarkoituksellisesti häiriötä SPS-palveluun tai kytkeä sen kokonaan pois käyttäjiltä (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle 2008) . Tämä riippuvuus on osaltaan johtanut muiden GNSS-järjestelmien kehitykseen.

GPS-järjestelmän paikannustarkkuus perustuu hyvin tarkkoihin atomikelloihin. Tämän hetkiset satelliittien kellot perustuvat rubidiumiin tai cesiumiin, joiden aika päivän aikana voi edetä tai viivästyä 10^{-6} - 10^{-10} s. GPS-satelliittien kellot toimivat ns. järjestelmän ominaistajuudella, joka on 10,23 MHz. Tästä on johdettu lähetystaajuuudet L1 ja L2, jotka ovat ominaistajuuden kerrannaisia. Uusin, modernisoinnin yhteydessä käyttöön tuleva taajuus on L5.

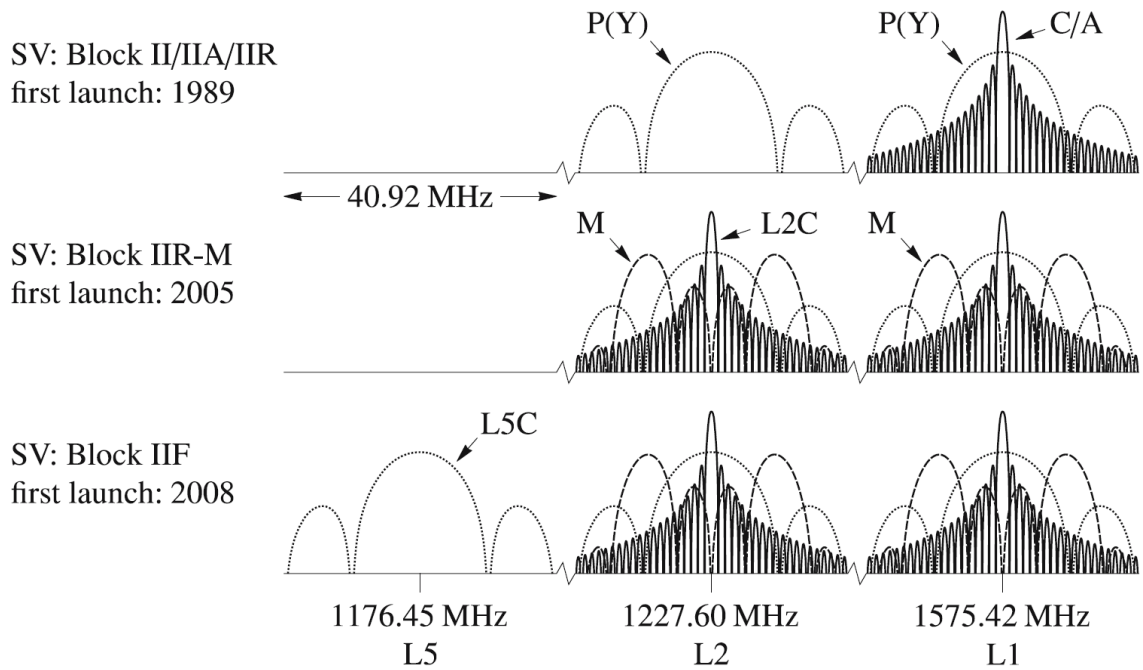
$$L1 = 154 \times 10,23 \text{ MHz} = 1575,42 \text{ MHz}$$

$$L2 = 120 \times 10,23 \text{ MHz} = 1227,60 \text{ MHz}$$

$$L5 = 115 \times 10,23 \text{ MHz} = 1176,45 \text{ MHz}$$

L1-taajuudella lähetetään satelliittikohtaista BPSK-moduloitua (Binary Phase Shift Keying) C/A-koodia (eng. Coarse/Acquisition). Tämä koodi on purettavissa varsin yksinkertaisesti ja se on kaikkien GPS-käyttäjien saatavissa. Koodin taajuus on 1,023 MHz, joka on kymmenesosa ominaistajuudesta. Koodi on 1023 bitin, tai alan kielellä ilmaistuna ”chipin” mittainen, noin 1 millisekunnin kestävä itseään toistava koodisekvenssi. Koodin yksittäisiä bittejä kutsutaan chipeiksi, koska koodisignaalin bitit eivät sisällä mitään informaatiota. Yksi lähetetty chip on signaalimatkaksi muutettuna noin 300 metriä pitkä. Jokainen satelliitti lähettää omaa C/A-koodiaan samalla L1-taajuudella, mutta koodit on suunniteltu siten, että ne korreloivat hyvin vähän keskenään, minkä ansiosta ne pystytään erottamaan toisistaan, vaikka ne lähetetään samalla taajuudella. Tätä radiotien kanavanvaraustekniikkaa kutsutaan CDMA:ksi (Code Division Multiple Access). (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle 2008)

PPS-palvelun P(Y)-koodin taajuus on 10,23 MHz. Se on kymmenkertainen verrattuna C/A-koodiin ja täten yksi chip vastaa matkana noin 30 metriä. Yhden koodisekvenssin pituus on noin 7 päivää, minkä takia lähetettävän koodisekvenssin oikeaa hetkeä on lähes mahdotonta löytää tietämättä sitä ennalta. Kuvassa 2 on esitetty GPS-järjestelmän signaalispektri.



Kuva 2.2 GPS-signaalien tehospektrit (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle 2008)

Kuvassa 2.2 on esitetty satelliittiversioiden tehospektrit ja vuosiluvut, jolloin ensimmäiset kyseisen tyypin satelliitit on laukaistu. Aikaisemmin L2 taajuudella lähetettiin vain P(Y)-koodia, mutta modernisoinnin myötä uusi L2C-koodi tulee siviilikäyttäjien saataville. Samalla armeijan käyttöön tulee uusi M-koodi. L5-taajuudelle tulee uusi L5C signaali ”safety of life”-sovelluksiin. Sen koodi suunnitellaan aiempia häiriösietoisemmaksi ja siten toimintavarmemmaksi. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle 2008)

2.4.2 GPS navigointiviesti

C/A- ja P(Y)-koodeja käytetään mittaamaan aika, joka signaalilla kestää edetä satelliitilta vastaanottimelle. Vastaanottimen paikan ratkaiseminen TOA-menetelmällä kuitenkin edellyttää, että lähettäjän paikka tiedetään. Tieto satelliitin paikasta välitetään navigointiviestinä. Navigointiviesti lähetetään samalla L1-taajuudella, mutta sen kooditaajuus on 50 bittiä/s. Käytännössä siis navigointiviestin yhden bitin aikana ehditään lähettää n. 20 toistoa C/A-koodia. Alhaisella bittinopeudella on pyritty varmistamaan, että navigointiviesti saataisiin vastaanotettua virheettömänä perille. (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle 2008)

Navigointiviesti koostuu pääkehyksestä, joka on 37500 bittiä pitkä. Tämä on jaettu pienempiin 1500 bittiä pitkiin kehyksiin, jotka on edelleen jaettu viiteen 300 bitin alikehykseen. Ensimmäisen kolmen alikehyksen sisältämät rata- ja muut tiedot tarvitaan vastaanottimen paikan ratkaisemiseksi. Neljäs ja viides alikehykset ovat osa pääkehystä, jotka yhdistetään jokaisesta 1500-bitin kehyksestä (Golstein 2010). Taulukossa 2.1 on esitetty navigointiviestin alikehysten keskeinen sisältö.

Taulukko 2.1 GPS-järjestelmän navigointiviestin sisältö (NAVCEEN 1995).

Navigointiviestin alikehys	Sisältö
1	GPS viikkonumero, satelliittikellojen korjausparametrit, Satelliittien toimintakuntodata 30 sekunnin välein toistuva
2	Satelliittien ratatietoja 30 sekunnin välein toistuva
3	Satelliittien ratatietoja 30 sekunnin välein toistuva
4	Almanakka ja toimintakuntodata satelliiteille 25-32, Spesiaaliviestit, Satelliittien konfiguraatioparametrit, Ionsfääri ja UTC dataa Osa navigointiviestin pääkehystä, sama sisältö toistuu 12,5 minuutin välein
5	Almanakka ja toimintakuntodata satelliiteille 1-24, almanakan referenssi aika ja GPS-viikkonumero Osa navigointiviestin pääkehystä, sama sisältö toistuu 12,5 minuutin välein

Navigointiviestin lataamiseen menee aikaa 12,5 minuuttia. Navigoimiseen ei kuitenkaan tarvita koko navigointiviestin sisältöä. Ensimmäiset kolme alikehystä riittävät paikkaratkaisun laskemiseen. Edellä mainittu 5 alikehysten ”nippu” toistuu 30 sekunnin välein. Paikkaratkaisuun tarvittava data saadaan siis lyhimmillään 18 sekunnissa. Nykyään vastaanottimet pystyvät tallentamaan navigointiviestin siten, että sen parametrit eivät katoa sammutettaessa. Tällöin vastaanottimen paikkaratkaisu saadaan nopeammin. Ensimmäistä paikkaratkaisua voidaan nopeuttaa myös välittämällä navigointiviesti esimerkiksi matkapuhelinverkon kautta vastaanottimelle.

2.4.3 Nykyhetki ja tulevaisuus

Pitkäaikainen GPS-satelliittien toimittaja Boeing toimittaa uudet GPS IIF satelliitit. Yhdysvaltojen ilmavoimat on tilannut 12 satelliittia, joista kolme on laukaistu vuoden 2010 jälkeen ja neljäs laukaistaan vuonna 2012. GPS IIF satelliittien keskeisimmät edut ovat parantunut tarkkuus kehittyneemmän atomikelloteknologian myötä, uusi L5-signaali ja uudelleen ohjelmoitavissa oleva prosessori, johon voidaan tehdä päivityksiä. (Boeing Defense: Space & Security 2012)

Vuonna 2008 Yhdysvaltojen ilmavoimat teki sopimuksen Lockheed Martinin kanssa kahden uuden GPS III satelliitin toimittamisesta. Vuonna 2012 ilmavoimat tilasi seuraavat kaksi satelliittia ja suunnitelmissa on tilata yhteensä 32 uuden sukupolven satelliittia. Keskeisin parannus näissä satelliiteissa on uusien signaalien kanssa parantunut paikannustarkkuus siviili- ja armeijakäyttäjille, enemmän lähetystehoa armeijan käyttämiin signaaleihin, pidempi suunniteltu käyttöikä ja yhteistoimivuus muiden GNSS-

järjestelmien kanssa. Ensimmäiset GPS III satelliitit on suunniteltu laukaistavaksi vuonna 2014. (Lockheed Martin Corporation 2012)

2.5 Muita satelliittinavigointijärjestelmiä

GPS-järjestelmä on toiminut esikuvana kaikille muille satelliittinavigointijärjestelmille. Riippuvuus Yhdysvaltojen hallitsemasta GPS-järjestelmästä on kuitenkin ajanut valtioita kehittämään omia vastaavia järjestelmiään. Tässä osiossa esitellään lyhyesti muita satelliittinavigointijärjestelmiä.

2.5.1 Glonass

Glonass (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) on Venäjän kehittämä satelliittinavigointijärjestelmä, jolla on hyvin paljon yhtäläisyyksiä GPS-järjestelmän kanssa. Se tarjoaa SPS- ja PPS-palvelua käyttäjilleen ja sen nykyinen suorituskky vastaava GPS-järjestelmää. Glonass-järjestelmässä on 21 aktiivista satelliittia ja 3 varasatelliittia. Satelliittiratojen inkliinaatiokulma on $64,8^\circ$ ja kiertoratojen korkeus on 19100 km. Keskeisin ero GPS-järjestelmään on, että jokainen käyttäjälle näkyvä satelliitti lähettää samaa koodisignaalia, mutta kukin omalla taajuudellaan. Glonassin käyttämät taajuuskaistat ovat

$$L1 = 1602 + n * 0.5625 \text{ MHz}, \quad n = -7, -6, \dots, 1, 0, 1, \dots, 6$$

$$L2 = 1246 + n * 0.4375 \text{ MHz}, \quad n = -7, -6, \dots, 1, 0, 1, \dots, 6$$

Tätä kanavanvaraustekniikkaa kutsutaan FDMA:ksi (Frequency Division Multiple Access). Käytössä olevia taajuuksia on yhteensä 14 ja ne riittävät 24 satelliitille siten, että vastakkaisilla puolella maapalloa olevat satelliitit käyttävät samaa lähetystaajuutta. (Misra, Enge 2006)

Glonass- ja GPS-järjestelmän yhteiskäyttö on mahdollista, mutta se vaatii vastaanottimen joka pystyy vastaanottamaan molempien järjestelmien signaalit. Järjestelmien yhteiskäyttö parantaa satelliittien saatavuutta, sekä satelliittien geometriaa josta tarkemmin kohdassa 2.8. Glonass-järjestelmä tuli täyteen konstellatioonsa 2.10.2011. (Smith 2011)

Glonass-satelliittien käyttöä harkittiin myös tässä diplomityössä, mutta tähän liittyy kaksi ongelmaa. Jokaisen Glonass-satelliitin signaalin aallonpituus on eri ja täten myös kellobiaksesta syntyvä virhe etäisyysmittaukseen on jokaiselle satelliitille eri. Kantoaaltoon perustuvassa paikannuksessa vastaanottimen kellobiasta ei saada eliminotua vastaavalla tavalla kuin GPS-järjestelmässä jossa virhe on kaikille mittauksille sama. Toinen ongelma syntyy siitä, että kantoaaltoon perustuvassa paikannuksessa tarvittavien kaksoisdifferenssien muodostamisessa ns. kokonaislukutuntemattomat menettävät kokonaislukuominaisuutensa. Glonass-järjestelmää on mahdollista käyttää kantoaaltoon perustuvassa paikannuksessa GPS vastaanottimen mittausten tukena, mutta Glonass-satelliitit lähinnä vain nopeuttavat paikkaratkaisun saamista.

2.5.2 Galileo

Galileo on Euroopan avaruusjärjestön (ESA) ja Euroopan unionin yhdessä toteuttama satelliittipaikannusjärjestelmä. Järjestelmä on tällä hetkellä kehitys- ja validointivaiheessa (IOV, In-orbit validation), kun kaksi ensimmäistä IOV-satelliittia laukaistiin lokakuussa 2011 kahden ensimmäisen testisatelliitin rinnalle. Lopullisessa järjestelmässä tulee olemaan 27 satelliittia ja 3 varasatelliittia. Järjestelmän odotetaan olevan täydessä toimintakunnossa vuonna 2020. (European Space Agency 2012)

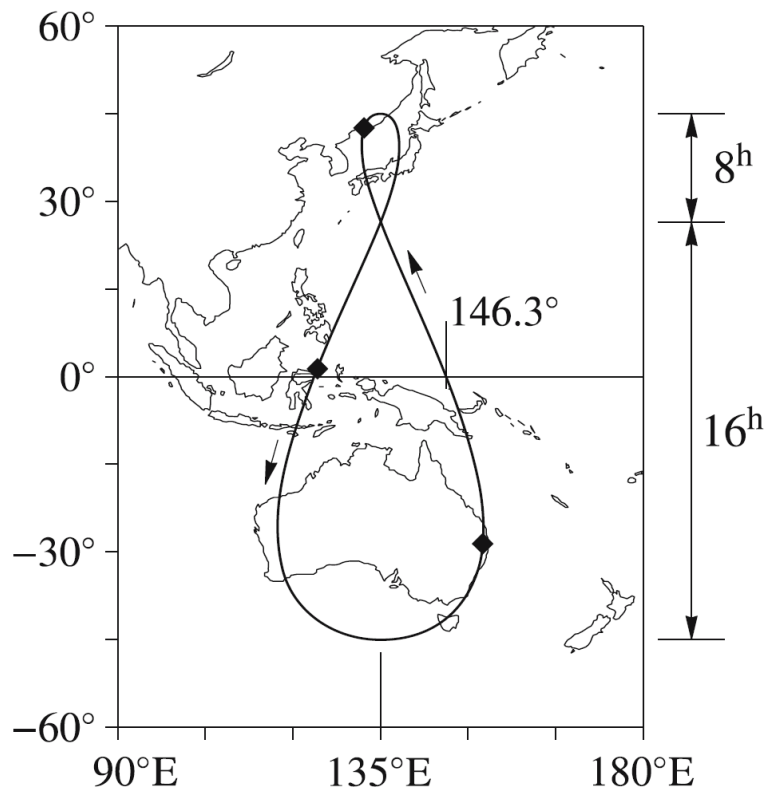
Galileo tarjoaa käyttäjille viisi palvelua: avoin palvelu (Open Service), kaupallinen palvelu (Commercial Service), henkeä turvaavat palvelut (Safety-of-Life), julkiset säännellyt palvelut (Public Regulated Service) ja etsintä- ja pelastuspalvelut (Search and Rescue). Galileo satelliitit tulevat sijoittumaan kolmelle eri MEO-kiertoradalle 23222 km korkeuteen ja kiertoratojen inkliinaatiokulmat ovat 56°. (European Space Agency 2012)

2.5.3 Compass

Compass on Kiinan kehittämä GNSS-järjestelmä, joka seuraa kiinan aikaisempaa alueellista satelliittipaikannusjärjestelmää Beidou-I:stä. Kiinan valtio ei ole antanut suuresti informaatio Compass-järjestelmän yksityiskohdista, mutta järjestelmän ”perustiedot” ovat saatavilla. Compass-järjestelmän toteutus aloitettiin vuonna 2004 ja se tarjoaa kahden palvelua: avointa siviileille tarkoitettua palvelua ja valtuutetuille käyttäjille olevaa palvelua. Järjestelmässä on 27 MEO-satelliittia, 5 GEO-satelliittia (Geostationary Earth Orbit) ja 3 satelliittia geosynkronisella radalla. 24 aktiivista tasaisesti sijoitettua MEO-satelliittia ovat kolmella eri kiertoradalla 21500 km korkeudella ja niiden inkliinaatiokulma on 55°. Kolme MEO-satelliittia toimii varasatelliitteina. GEO-satelliitit ovat 35785 km korkeudella ja niiden inkliinaatiokulma on 55°. (Hofmann-Wellenhop, Lichtenegger & Wasle 2008)

2.5.4 Quasi-Zenith Satellite System

Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) on Japanissa kehitetty alueellinen satelliittipaikannusjärjestelmä. Sen kehitys alkoi vuonna 2003 ja perusteina sen kehittämiseksi pidettiin riskiä muiden GNSS-järjestelmien palvelujen heikentymisestä tai vikaantumisesta. QZSS on suunniteltu toimimaan yhdessä GPS-järjestelmän kanssa ja sen tavoitteena on parantaa satelliittien saatavuutta ja paikannuksen suorituskykyä. Kuvassa 2.3 on kiertorata, jolla QZSS-järjestelmän satelliitit kulkevat.

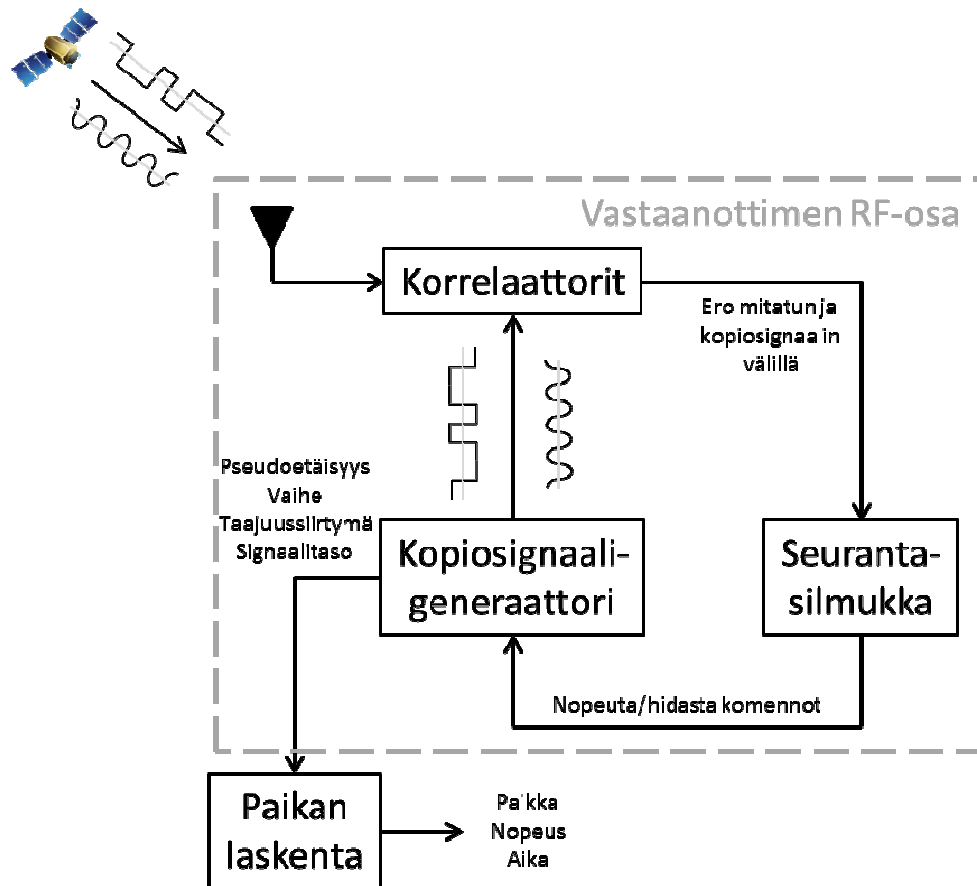


Kuva 2.3 QZSS-satelliittien kiertorata (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle 2008) .

Kiertoradalla on kolme satelliittia, joista yksi on aina Japanin yllä. Kiertoradan suunnittelussa on pyritty maksimoimaan aika jonka satelliitti on Japanin yllä (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger & Wasle 2008) . Ensimmäinen QZSS-järjestelmän satelliitti laukaistiin 11.9.2010. (Japan Aerospace Exploration Agency 2010)

2.6 Vastaanottimen toiminta

Satelliittivastaanotin luo satelliittien lähettämistä signaaleista kopiot. Heti käynnistyksen jälkeen vastaanotin alkaa etsiä satelliitteja usealla kanavalla. Yksi kanava vastaa yhden satelliitin etsimisestä ja seuraamisesta. Kuvassa 2.4 on esitetty käsitteellisellä tasolla vastaanottimen toiminta perustuen Misran ja Engen kirjaan (Misra, Enge 2006).



Kuva 2.4 Vastaanottimen toimintaperiaate.

Vastaanotin pyrkii löytämään sopivan vastaanottotaajuuden, eli lähetystaajuuden johon on summattu taajuussiirtymä ja koodiviive. Vastaanottimessa luodun C/A-koodisignaalin vaihetta verrataan mitattuun vaiheeseen ja signaali lukittuu, kun seuraavat auto- ja ristikorrelaatio ehdot täyttyvät. Kirkko-Jaakkola on esittänyt seuraavan määritelmän ja ehdot. (Kirkko-Jaakkola 2008)

Määritelmä 2.1. Korrelaatio kahden koodisekvenssin x ja y , ja viivästetyn y :n kanssa on

$$\text{corr}(x, y, d) = \sum_i x_i y_{i-d} \quad (2.2)$$

C/A-koodilla tarkoitetaan binäärikoodia, joka täyttää seuraavat korrelaatio-ominaisuudet:

1. Autokorreloitumaton: Koodi ei korreloi viivästetyn tai edistetyn koodikopionsa kanssa ellei viive tai edistys ole 0.

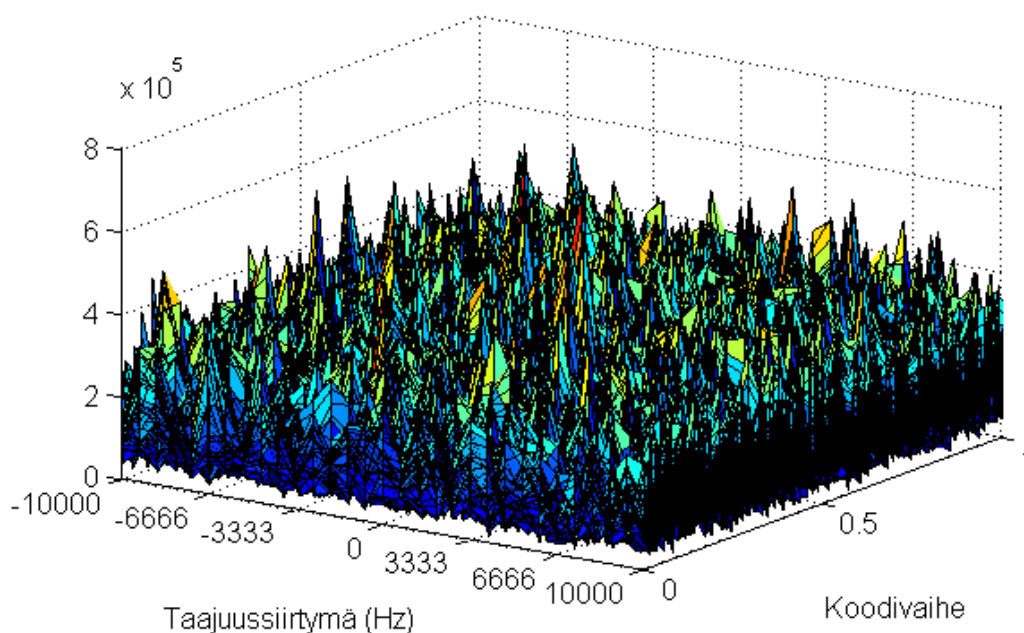
$$\text{corr}(x, x, d) \approx 0, \text{ kun } d \neq 0$$

2. Risti-korreloitumaton: Koodi ei korreloi toisen satelliitin koodin kanssa millään viiveellä.

$$\text{corr}(x, y, d) \approx 0, \text{ kun } x \neq y$$

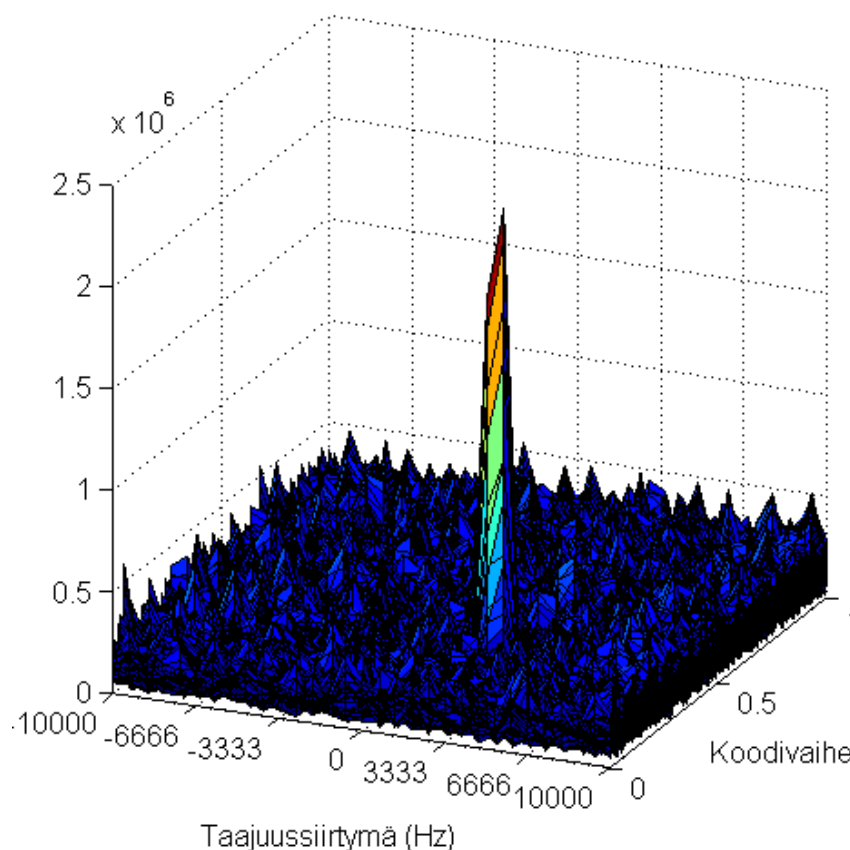
Paikallisen kopion ja mitatun signaalin korrelaation maksimia etsitään sillä n. 1 ms viiveaikaikkunalla, jonka C/A-koodi kestää. Lisäksi vastaanotin etsii satelliitin tunnetun lähetystaajuuden ympäristöstä (1575,42 MHz) sopivaa vastaanottotaajuutta. Lähetystaa-

juuden ympäristö on jaettu taajuuslokeroihin (Doppler bin), jotka ovat tasaisin välein lähetystaajuuden molemmin puolin. Sopiva koodivaihe ja taajuus erottuvat taustakohinasta vahvana korrelaationa. Vastaanottotaajuutta joudutaan hakemaan, koska satelliitti ja vastaanotin liikkuvat toisiinsa nähden. GPS-satelliitti liikkuu kiertoradallaan noin 3,9 km/s nopeudella. Satelliitti ei kuitenkaan koskaan liiku suoraan maapallon pinnalla olevaa vastaanotinta kohti, mutta nopeusvektorin vastaanottimeen osoittava komponentti aiheuttaa muutoksen vastaanottotaajuuteen. Kuvassa 2.5 on esitetty etsinnän tulos, kun mitatusta datasta on haettu korreloivinta vastaanottotaajuutta ja koodivaihetta.



Kuva 2.5 Vastaanottimen yhden kanavan mittaus, kun korreloivaa satelliittisignaalia ei ole.

Vastaanotin on hakenut 666 Hz:n välein sopivaa vastaanottotaajuutta 15 taajuuslokeron välein molempiin suuntiin. Vastaanotin on löytänyt joitain piikkejä, jotka voivat olla toisten satelliittien aikaansaamia. Haetulla C/A-koodilla olevaa satelliittia ei ole löytynyt. Satelliitti voi olla katveessa tai se ei välttämättä ole lainkaan vastaanottimen nähtävissä. Kuvassa 2.6 on esitetty tilanne, jossa näkyy vahva korrelaatio haetulla C/A-koodilla ja yhdellä tutkituista vastaanottotaajuuksista.



Kuva 2.6 Vastaanotin on löytänyt selkeän korrelaatiopiikin etsimälleen satelliitin C/A-koodille.

Tyypillisesti selkeitä korrelaatiopiikkejä löytyy esimerkiksi GPS-järjestelmässä 6-8 kanavalta joka tarkoittaa että 6-8 satelliittia on käytettävissä mittauksiin ja paikan ratkaisemiseen. Vastaanotin pyrkii seuraamaan satelliittia löydettyään sopivan taajuussiirtymän ja koodivaiheen. Korrelaatiopiikki liikkuu taajuusakselilla vastaanottimen ja satelliitin suhteellisen liikkeen mukaan. Jos signaalitielle tulee este, korrelaatiopiikki vaimenee. Voimakas vaimeneminen aiheuttaa korrelaatiopiikin hukkumisen taustakohinaan, eikä vastaanotin enää pysty erottamaan signaalia taustakohinasta.

2.7 Mittausmallit

Vastaanottimen paikka ratkaistaan satelliittien ja vastaanottimien etäisyys- ja vaihemittauksista. Seuraavassa kuvataan tarkemmin nämä mittausmallit. Satelliittivastaanotin mittaa tyypillisesti neljä arvoa kustakin satelliitista: pseudoetäisyyden, kantoaallon vaiheen, kantoaallon taajuussiirtymän ja kantoaallon tehon suhteessa kohinan tehoon (Carrier-to-noise-ratio, C/N0).

2.7.1 Pseudoetäisyysmittaus

Satelliitin generoimaa C/A-koodia käytetään etäisyyden mittaamiseen satelliitilta vastaanottimelle. Mittaus sisältää virhelähteitä, jonka takia siitä käytetään nimitystä pseudoetäisyys. Pseudoetäisyyden mittausyhtälö voidaan määritellä seuraavasti

$$p = r + c(dt - dT) + d_{ion} + d_{trop} + d_{\rho} + \varepsilon_{mp} + \varepsilon_p \quad (2.3)$$

missä p on pseudoetäisyysmittaus, r todellinen etäisyys, d_{ρ} satelliitin ratavirhe, c on valonnopeus, dt vastaanottimen kellobias, dT satelliitin kellobias, d_{ion} ionosfäärin aiheuttama viivematk, d_{trop} troposfäärin aiheuttama viivematk, ε_{mp} monitie-etenemisestä aiheutunut virhe ja ε_p vastaanottimen kohinasta aiheutunut virhe. Näitä virheitä käsitellään tarkemmin myöhempanä.

2.7.2 Kantoaallon vaihemittaus

Satelliittivastaanotin mittaa kantoaallon vaihetta, jonka avulla se voi laskea vastaanottimelle saapuneiden kokonaisten kantoaaltojen määrän tietyistä ajanhetkeistä eteenpäin. Esimerkiksi yhden L1-taajuuden kantoaallon pituus oli n. 19 cm, jolloin mittaamalla sen osia eli vaihetta, päästään millimetrituokan tarkkuuksiin. Tätä kantoaaltoon perustuvaa mittausta ja paikannusta käsitellään myöhempanä. Kantoaallon vaihemittausmalli määritellään seuraavasti

$$\lambda\phi = r + c(dt - dT) + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + d_{\rho} + \varepsilon_{mp} + \varepsilon_p \quad (2.4)$$

ϕ on kokonaisten vaiheiden lukumäärä ja murto-osa skaalattuna aallonpituudella λ etäisyysmittaukseksi. Kokonaisluku N on kokonaisten kantoaaltojen lukumäärä satelliitin ja vastaanottimen välillä. Erona koodimittauksen virheille, ionosfääri edistää kantoaallon vaihetta.

2.7.3 Sijainnin ratkaiseminen pseudoetäisyyden avulla

Yleisimmin GPS-vastaanotin laskee paikkaratkaisun vain pseudoetäisyyksien avulla. Täten pseudoetäisyysmittausten tarkkuus määrittelee paikkaratkaisun tarkkuuden. Single Point Positioning (SPP) algoritmi aloitetaan linearisoimalla ei-lineaarinen pseudoetäisyysyhtälö 2.3 johonkin arvattuun pisteeseen (linearisointi piste). Mittausten ja linearisointi pisteen eron avulla paikkaratkaisua ja kellobiasta pystytään korjaamaan. Matriisi muodossa esitettyä malli voidaan kirjoittaa seuraavasti

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{H} \Delta \mathbf{x} \quad (2.5)$$

$$\Delta \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \\ \Delta p_3 \\ \vdots \\ \Delta p_n \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} & 1 \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} & 1 \\ a_{x3} & a_{y3} & a_{z3} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{xn} & a_{yn} & a_{zn} & 1 \end{bmatrix}, \Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta c(dt - dT) \end{bmatrix}$$

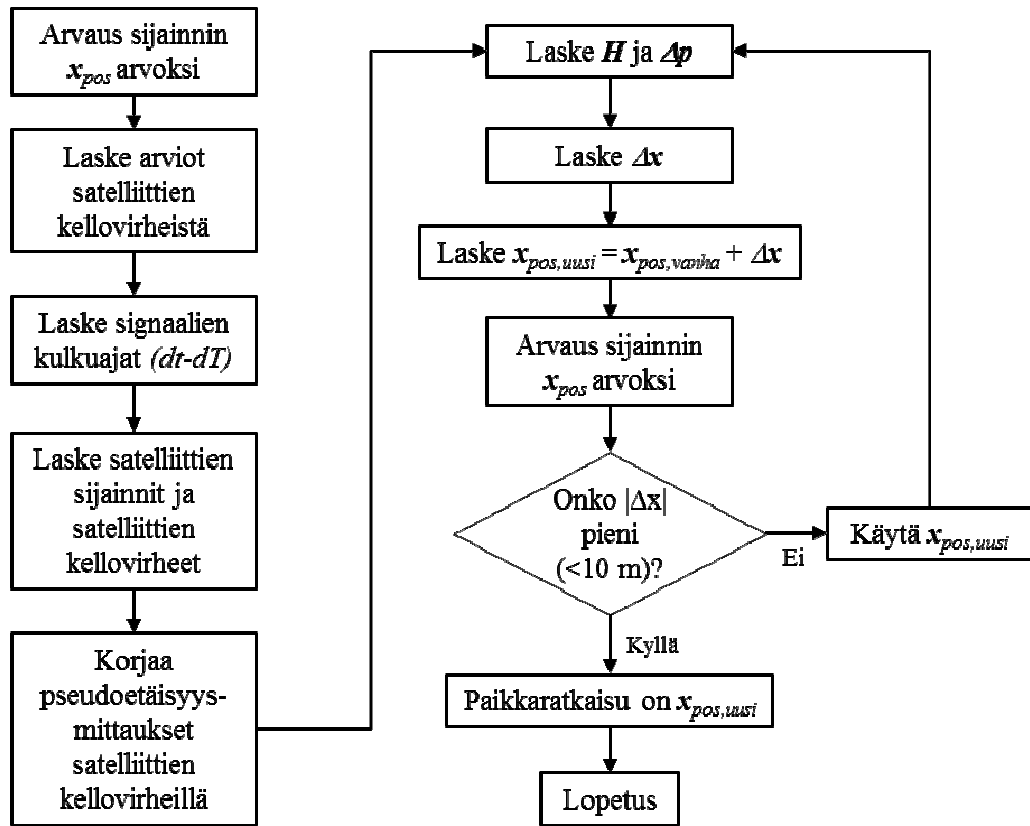
missä $\Delta \mathbf{p}$ on havaittujen satelliittien mittainen vektori joka sisältää mitatun ja mallinnetun pseudoetäisyyden väliset erot. $\Delta \mathbf{x}$ on vektori, joka sisältää ratkaistavat tuntemattomat eli käyttäjän sijainti- ja kello-offsetin linearisointi pisteestä. \mathbf{H} on $n \times 4$ mat-

riisi, joka sisältää kaikille mitatuille satelliiteille osittaisderivaatat tuntemattomien suhteen. Vektorin \mathbf{H} kolme ensimmäistä saraketta ovat siis yksikkövektoreita, jotka osoittavat linearisointi pisteestä satelliitteihin. Neljännessä sarakkeessa on vain ykkösiä.

Vastaanotin ratkaisee vektorin $\Delta\mathbf{x}$ pienimmän neliösumman menetelmällä tai vaihtoehtoisesti Kalman-suotimella. Pienimmän neliösumman menetelmällä vektorin $\Delta\mathbf{x}$ ratkaisu voidaan määritellä seuraavasti

$$\Delta\mathbf{x} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \Delta\mathbf{p} \quad (2.6)$$

jossa \mathbf{W} on painotusmatriisi joka määrittelee samanaikaisten mittausten väliset erot, sekä mahdolliset korrelaatiot näiden välillä. Voidaan todeta myös, että $\mathbf{W} = \sigma_0^2 \mathbf{C}_{\Delta p}^{-1}$, jossa $\mathbf{C}_{\Delta p}$ on pseudoetäisyysmittavirheiden kovarianssimatriisi ja σ_0^2 skaalaava, ennalta tunnettu varianssikerroin. SPP algoritmin lohkokaavio on hahmoteltu kuvassa 2.7.



Kuva 2.7 SPP-algoritmin lohkokaavio.

Pseudoetäisyysmittauksissa olevat virheet oletetaan satunnaisiksi muuttujiksi jotka ovat jakautuneet gaussisesti nollan ympärille. Edelleen vektorin $\Delta\mathbf{x}$ kovarianssi on gaussisesti jakautunut nollan ympärille. Vektorin $\Delta\mathbf{x}$ muuttujien kovarianssimatriisi voidaan määritellä seuraavasti

$$\mathbf{C}_{\Delta x} = ((\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W}) \mathbf{C}_{\Delta p} ((\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W})^T \equiv (\mathbf{H}^T \mathbf{C}_{\Delta p}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \quad (2.7)$$

jota voidaan yksinkertaistaa olettamalla kaikkien pseudoetäisyyksien virheiden olevan samalla tavalla normaalijakautuneita (σ) ja ei-korreloivia. Tällöin yhtälö 2.7 voidaan kirjoittaa seuraavasti

$$\mathbf{C}_{\Delta x} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \sigma^2 = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xct}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_y^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yct}^2 \\ \sigma_{xz}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_z^2 & \sigma_{zct}^2 \\ \sigma_{xct}^2 & \sigma_{yct}^2 & \sigma_{zct}^2 & \sigma_{ct}^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Kovarianssimatriisin $\mathbf{C}_{\Delta x}$ diagonaalitermit määrittelevät käyttäjän arvioidun sijainnin ja kellobiaksen varianssit. Ei-diagonaalitermit määrittelevät korrelaatiot eri paikkaratkaisujen epävarmuuksien välillä.

Kohdassa 2.8 esitellään eri virhelähteet, jotka voivat vaikuttaa etäisyyksimittauksiin. Jos kaikkien näiden virheiden oletetaan olevan riippumattomia, voidaan ne yhdistää ottamalla virheiden neliöistä neliöjuuri (eng. root-sum-square) josta saadaan arvo kaikkien virheiden jakauma σ . Tästä virheiden summasta käytetään kirjallisuudessa termiä User Equivalent Range Error (UERE) jota merkitään myöhempanä termillä σ_{UERE} .

2.8 Virhelähteet

Virhelähteet voidaan jaotella eri osa-alueille, esimerkiksi korjattavuuden mukaan. Seuraavissa osioissa esitelty virheet on jaettu kolmeen osa-alueeseen: virheisiin satelliitissa, signaalitiellä ja vastaanottimessa. Virhelähteissä käytetään GPS-järjestelmää esimerkkinä, mutta virhetarkastelut pätevät myös muihin vastaaviin GNSS-järjestelmiin.

Käännekohta GPS-järjestelmän paikannustarkkuudessa tapahtui toukokuussa vuonna 2000. Siihen asti GPS-järjestelmän SPS-palvelua oli tahallisesti heikennetty lisäämällä satelliitin ratatietoon ja kellon korjausparametriin virhettä (SA, Selective Availability). Seuraavassa osiossa on käyty yksityiskohtaisemmin läpi virhelähteet jättäen SA:n vaikutus huomiotta.

2.8.1 Satelliitista johtuvat virheet

Satelliitin ”sydämenä” toimii hyvin tarkka atomikello, jota käytetään signaalien generoimiseen muiden toimintojen ohella. Atomikello on hyvin tarkka ja stabiili, mutta ajan kuluessa lämpötilavaihtelu, säteily ja kuluminen voivat aiheuttaa jopa 1 ms siirtymän (noin 300 km pseudoetäisyytenä) GPS-ajasta. Atomikellon ja GPS-ajan välistä eroa valvotaan ja korjausparametri lähetetään käyttäjille navigointiviestissä, jolloin sen vaikutus saadaan kumottua mittauksista. Navigointiviesti päivitetään yleensä vuorokauden välein, joten aika viimeisimmästä navigointiviestistä vaikuttaa satelliitin kellobiaksen suuruuteen. Juuri päivitetyillä korjausparametreilla vaikutus pseudoetäisyyksimittaukseen on noin 0,8 metriä, mutta 24 tunnin jälkeen vaikutus voi olla 1-4 metriä. (Kaplan, Hegarty 2006)

Satelliitit kiertävät ennalta määrättyä rataa. Satelliittia joudutaan kuitenkin jatkuvasti ohjaamaan, koska siihen vaikuttaa maan ja kuun vetovoimat, jotka ajavat satelliitin si-

vuun suunnitellulta kiertoradalta. Satelliitin ratavirhe määritellään ennustamalla sen nykyinen sijainti 24–48 tuntia edeltävistä mittauksista. Satelliitin ratavirheen korjaus välitetään navigointiviestissä. Virheen vaikutus pseudoetäisyysmittauksiin on noin 0,8 metriä. (Kaplan, Hegarty 2006)

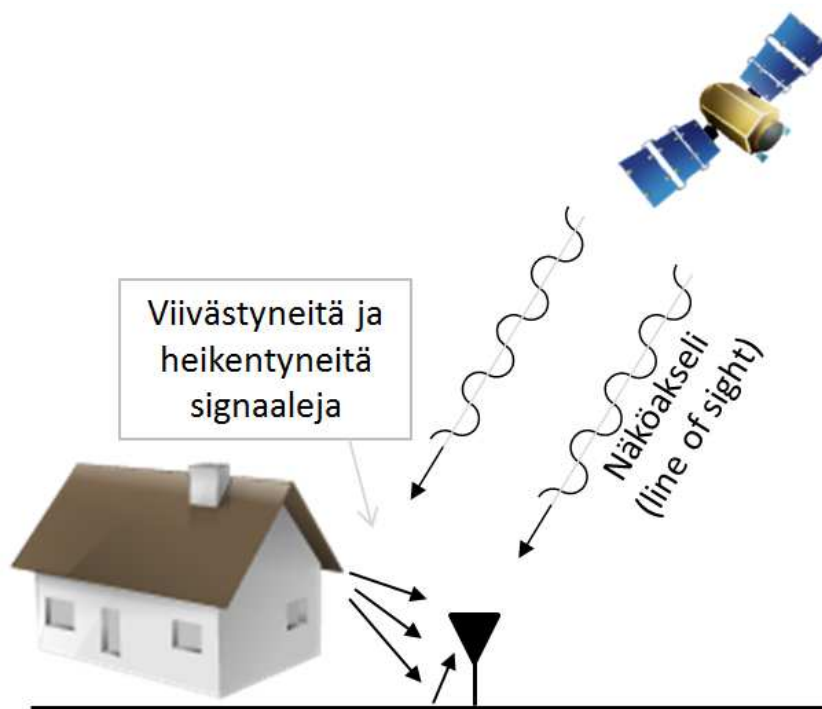
Satelliitin relativistisia vaikutuksia on kolme. Erityisen suhteellisuusteorian ja yleisen suhteellisuusteorian mukaan satelliitin kello näyttää maassa olevalle käyttäjälle eri taajuutta kuin mitä se satelliitissa on. Tämä ilmiö korjataan asettamalla satelliitin taajuudeksi maassa ennen laukaisua 10,22999999543 MHz. Tällöin satelliitin lopullisella kiertoradalla taajuus näkyy käyttäjille 10,23 MHz taajuutena. Tämän virheen vaikutus korjaamattomana voi olla jopa 70 ns (noin 21 m etäisyytenä). Toinen relativistinen vaikutus on Sagnac -ilmiö. Satelliitista lähtevän signaalin lähetys hetken ja signaalin vastaanottohetken välillä vastaanotin ehtii pyöriä maapallon mukana tietyn matkan. Korjaamattomana tästä voi aiheutua 30 metrin paikannusvirhe. Kolmantena relativistisena ilmiönä on GPS-signaaliin vaikuttava maan vetovoima, joka kaareuttaa signaalia kuljetavaa sähkömagneettista säteilyä. Tämän ilmiön vaikutus tarkkuuteen on maksimissaan n. 18,7 mm. (Kaplan, Hegarty 2006)

2.8.2 Signaalitien virheet

Ionosfääri ulottuu noin 70 km korkeudesta 1000 km:iin. Ionosfäärissä olevat kaasut ionisoituvat auringon ultraviolettisäteiden vaikutuksesta ja vapauttavat elektroneja. Vapaiden elektronien määrää kuvastaa TEC-luku (Total Electron Count) jonka yksikkö on elektronia/m². TEC-lukuun vaikuttaa käyttäjän sijainti, päivän aika käyttäjän sijainnissa, satelliitin elevaatiokulma, vuodenaika, ionisoiva vuo, magneettinen aktiivisuus, auringon pilkut ja tuike (eng. scintillation). Ionosfääri vaikuttaa satelliitilta tulevaan informaatioodataan (C/A-koodiin ja navigointidataan) hidastavasti, mutta kantoaaltoon edistävasti. Muutos näissä on yhtä suuri mutta vastakkaismerkkinen. Matalalla elevaatiokulmalla olevan satelliitin signaali voi viivästyä lähes kolme kertaa niin paljon, kuin suoraan yläpuolella (zeniitissä) olevan satelliitin signaali. Zeniitistä tulevan signaalin viive voi vaihdella yön 10 ns:sta päivän 50 ns:iin (matkana noin 3 ja 15 metriä). Keskiarvotettu virhe kaikki vuorokaudenajat ja elevaatiokulmat huomioon ottaen on n. 7 metriä. Eri taajuudet hidastuvat ionosfäärissä eri tavalla jolloin kaksitaajuusvastaanottimella ionosfäärin aiheuttama viive voidaan mitata ja korjata. Yksitaajuusvastaanottimella tämä ei ole mahdollista, vaan virhe korjataan yleensä käyttäen mittausmallia. (Kaplan, Hegarty 2006)

Troposfääri on ionosfäärin ja maanpinnan välinen ilmakehä, jonka vaikutus kantoaaltoihin eri taajuuksilla ja informaatioodataan on samanlainen. Troposfääristä aiheutuva viive johtuu paikallisesta lämpötilasta, paineesta ja kosteudesta. Viivematka voi vaihdella 2,4 metristä (zeniitissä) 25 metriin (5° elevaatiokulmassa oleva satelliitti). (Kaplan, Hegarty 2006)

Monitie-eteneminen on yksi haastavimmista virhelähteistä, koska sitä on vaikea mallintaa ja sitä kautta myös sen aiheuttamaa virhettä on haastavaa korjata. Monitie-etenemisen ongelmaa on hahmoteltu kuvassa 2.8.



Kuva 2.8 Monitie-etenemisen aiheuttamat heijastukset.

Monitie-etenemisen aiheuttamien virheiden ehkäisemistä tutkitaan jatkuvasti ja muutamia tapoja vähentää sen vaikutusta on olemassa. Antennin sijoittaminen etäälle heijastavista pinnoista on helpoin monitie-etenemisen aiheuttamia virheitä ehkäisevä menettelytapa. Lisäksi antennin korkeudella voidaan vaikuttaa monitie-etenemisen vaikutuksiin. Jos lähiympäristössä on paljon heijastuspintoja, antenni voidaan asettaa lähelle maan pintaa, jolloin heijastuneiden signaalien ero viiveessä suhteessa näköakselin signaaliin on pienempi. Jos esteitä on vain lähellä horisonttia, antennin korkeutta nostamalla voidaan vastaanottaa paremmin myös lähellä horisonttia olevien satelliittien signaalit. Antennit voidaan myös suunnitella siten, että ne vaimentavat matalalta ja antennin alapuolelta tulevia signaaleja, koska tästä suunnasta ei signaaleja odoteta. Kehittyneissä vastaanottimissa on käytössä elementtejä, jotka pyrkivät tunnistamaan heijastuneet signaalit esimerkiksi viiveen tai signaalin vaiheen avulla. Kaplan ja Hegarty ovat kirjassaan maininneet signaalin häipymisen (eng. shadowing) monitie-etenemisen eräänä muotona. Esimerkiksi tiheä puusto voi vaimentaa näköakselia kulkevan signaalin, jolloin vastaanotin pystyy seuraamaan vain heijastunutta signaalia. Monitie-etenemisen monimuotoisuuden vuoksi sen aiheuttama virhe paikkaestimaattiin voi olla hyvin vaihteleva. Heijastuksen kautta tulevasta signaalista mittaaminen voi aiheuttaa useiden metrien virheen. (Kaplan, Hegarty 2006)

2.8.3 Vastaanottimesta ja antennista johtuvat virheet

Vastaanottimessa oleva kello on atomikelloa huomattavasti edullisempi oskillaattori. Vastaanottimen kellon ja GPS-ajan välinen erotus, kellobias, korjataan neljännellä mittauksella, joka esiteltiin kohdassa 2.3.

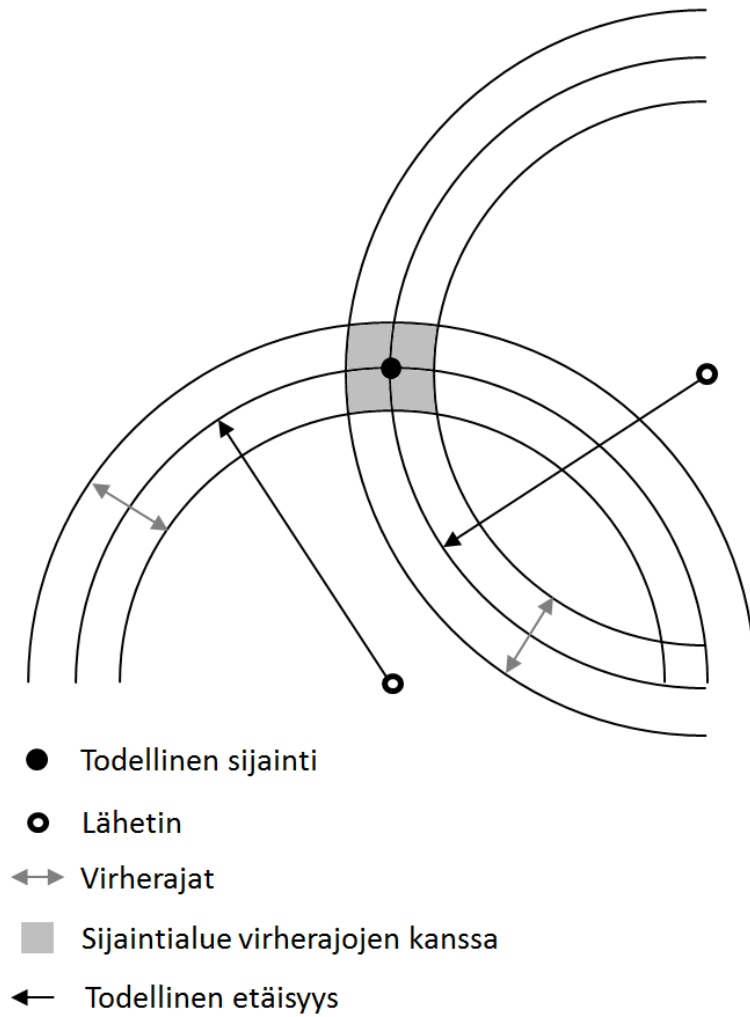
Vastaanottimen antennissa on vaihekeskipiste, johon GPS-signaali saapuu ja josta kaikki mittaukset tehdään. Vaihekeskipiste ei välttämättä ole geometrisesti keskellä antennia, vaan se voi olla hieman sivussa. Kahden tai useamman vastaanottimen mittauksissa vaihekeskipisteen vaihtelun vaikutus voidaan poistaa käyttämällä samanlaisia antennia suunnattuna samaan suuntaan. Vaihekeskipisteen vaikutus on kuitenkin vain muutamia senttimetrejä ja siksi se yleensä jätetään huomiotta tulosten tarkastelussa. (El-Rabbany 2002). Antennin laadusta riippuen vaihekeskipiste voi myös vaihdella, mikä luonnollisesti vaikeuttaa vastaanottimen mittauksia ja satelliittien seurantaa.

Korkean tarkkuuden paikannussovelluksissa on huomioitava myös antennin vaihekeskipisteen ja vastaanottimen digitaalipiirien välissä syntyvä viive. Pitkässä antennikaapelissa viive voi olla jopa 1 μ s ja sen vaikutus on suositeltavaa kalibroida pois ennen mittauksia. Viiveen vaikutus on kuitenkin vain muutamia millimetrejä, minkä takia kalibrointi suoritetaan vain suurta tarkkuutta vaativissa mittauksissa.

Mittauksiin vaikuttaa myös vastaanottimen mittaustarkkuus ja sisäinen kohina. Vastaanottimessa olevan vaihe lukitun silmukan (Phase Locked Loop, PLL) tarkkuus on sisäisen kohinan ja pyöristysten aiheuttamien virheiden vuoksi tyypillisesti noin 1,6 mm C/A-koodille ja 1,2 mm P(Y)-koodille. Vastaanottimen sisäistä kohinaa voidaan arvioida erottamalla kahden samanlaisen vastaanottimen samat mittaukset toisistaan. Tätä sanotaan kaksoisdifferenssiksi, joka määritellään tarkemmin kohdassa 3.3.2. Diplomi-työn vastaanottimien kohinaa arvioidaan kohdassa 6.3. Nykyaikaisten vastaanottimien kohinan aiheuttama varianssi on desimetrien suuruusluokkaa. (Kaplan, Hegarty 2006)

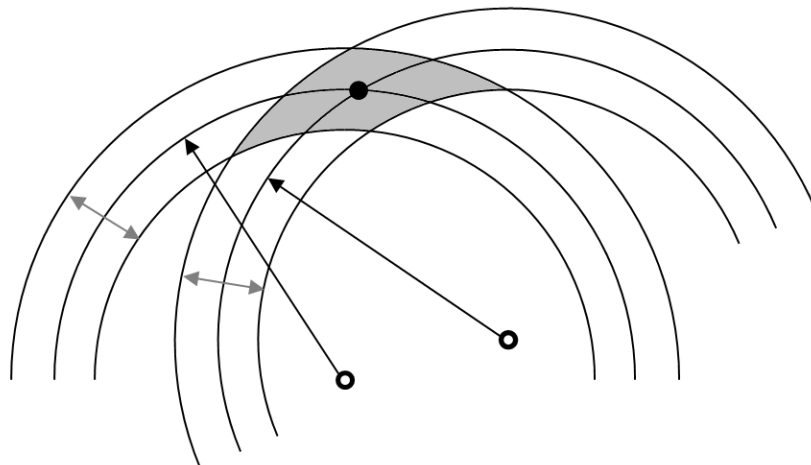
2.8.4 Satelliittien suhteellinen geometria

Satelliittien suhteellista geometriaa voidaan havainnollistaa tarkentamalla aikaisemmin mainittua sumutorviesimerkkiä. Kuvassa 2.9 on havainnollistettu TOA-mittausta kahdelta lähettimeltä virherajoihin.



Kuva 2.9 Hyvä satelliittigeometria.

Kuvasta nähdään käyttäjän kannalta hyvä satelliittigeometria, jossa virheet sisältävä sijaintialue jää mahdollisimman pieneksi. Kuvassa 2.9 on huono satelliittigeometria, jossa alue jää selvästi suuremmaksi vaikka virhealueet ovat yhtä suuret.



Kuva 2.10 Huono satelliittigeometria.

Virhealueen suuruutta ja paikkaratkaisun laatua kuvataan DOP-luvulla (Dilution of Precision). Eri DOP-luvut (Geometric DOP) lasketaan kohdassa 2.7 määritellyn kovarianssimatriisin $C_{\Delta x}$ diagonaalitermeistä ja virheiden jakaumasta σ_{URE} .

$$GDOP \text{ (Geometric DOP)} = \frac{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_{ct}^2}}{\sigma_{URE}} = \frac{\sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2 + \sigma_U^2 + \sigma_{ct}^2}}{\sigma_{URE}} \quad (2.9)$$

$$PDOP \text{ (Position DOP)} = \frac{\sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2 + \sigma_U^2}}{\sigma_{URE}} \quad (2.10)$$

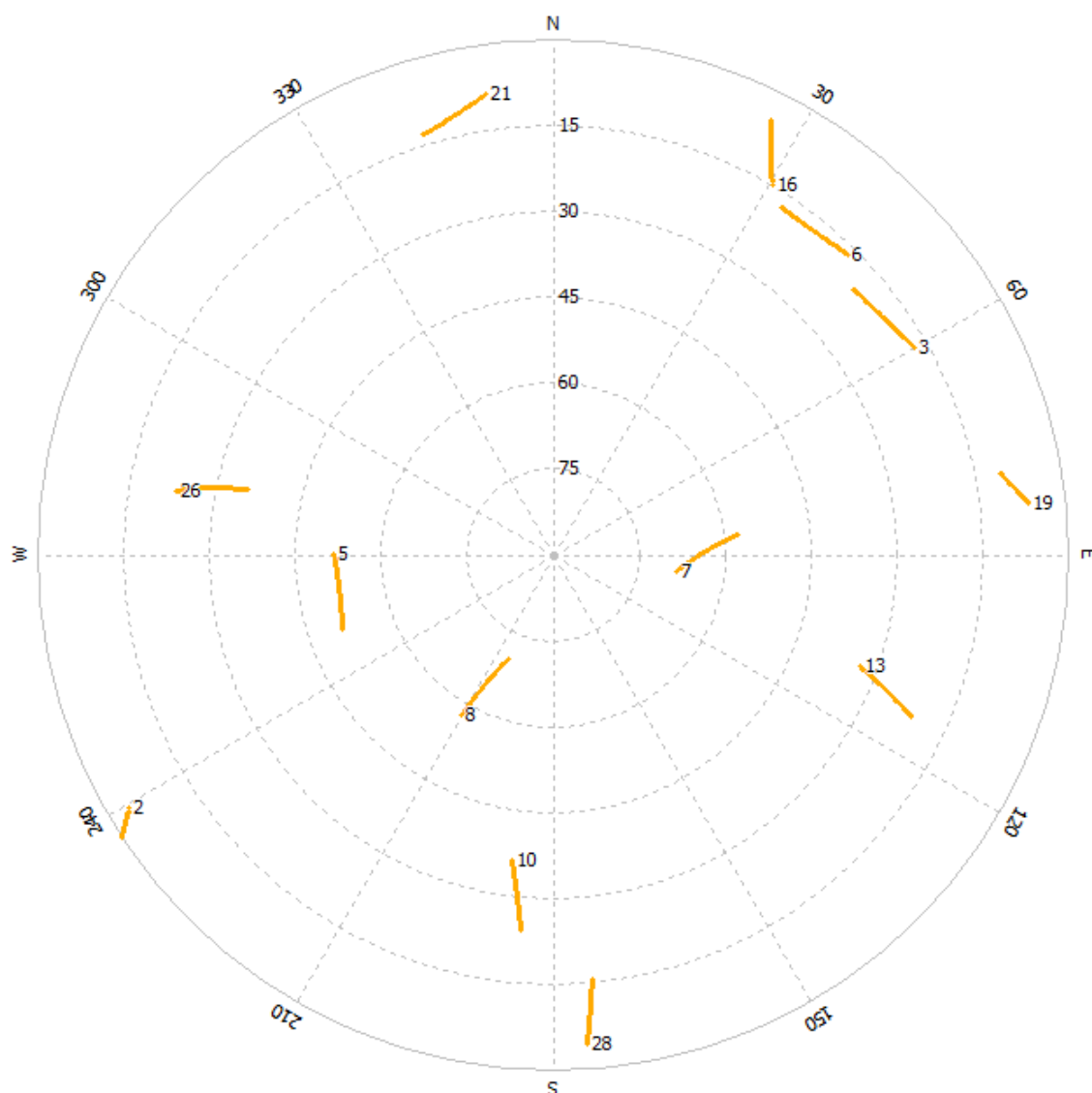
$$HDOP \text{ (Horizontal DOP)} = \frac{\sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2}}{\sigma_{URE}} \quad (2.11)$$

$$VDOP \text{ (Vertical DOP)} = \frac{\sigma_U}{\sigma_{URE}} \quad (2.12)$$

$$TDOP \text{ (Time DOP)} = \frac{\sigma_{ct}}{\sigma_{URE}} \quad (2.13)$$

Virhejakaumat σ_E , σ_N ja σ_U ovat vastaanottimen lokaalin ENU-koordinaatiston (eng. local east, north, up coordinates) suuntaisia ja σ_{ct} on vastaanottimen kellobiaksen virhejakauma. Voidaan ajatella, että käyttäjä ja satelliitit muodostavat pyramidin, jonka kärjissä käyttäjä ja satelliitit ovat. Pyramidin tilavuus on verrannollinen DOP-lukuun: mitä suurempi tilavuus, sitä pienempi DOP-luku.

DOP-luku on pienin, kun neljästä satelliitista ja käyttäjästä muodostuvan pyramidin tilavuus on mahdollisimman suuri. Toisaalta suositetaan mahdollisimman lähellä zeniittiä olevia satelliitteja, jolloin signaali viivästyy vähiten. Usein esimerkiksi alle 10° elevaatiokulman satelliitit saatetaan ilman muuta jättää käyttämättä. Täten vastaanottimen tulee löytää jonkinlainen kompromissi satelliitteja valittaessa. Käyttäjä voi arvioida satelliittien geometriaa esim. taivasnäkökuvaajalla, sekä vastaanottimen ilmoittamalla DOP-luvuilla. Kuvassa 2.11 on esitetty vastaanottimen eräästä mittausdatasta piirretty taivasnäkökuvaaja.



Kuva 2.11 Taivasnäkökuvaaja, jossa näkyy satelliittien reitit n. 30 minuutin ajalta.

Kuva 2.11 on saatu RTKLIB-ohjelmistolla ja kuvan mittauksen GDOP oli keskiarvoltaan noin 1,6 ja PDOP noin 1,5. Pieni DOP-arvo yleensä nopeuttaa RTK-mittauksen käynnistysvaihetta, koska sijaintialue on pieni. Taulukossa 2.2 on määritelmät eri DOP-tasoista (Yuen 2009).

Taulukko 2.2 Eri DOP-lukujen määritelmät (Yuen 2009).

DOP-luku	Arvio	Määritelmä
1	Ideaali	Korkein mahdollinen luottamus mittausten tarkkuuteen. Sovelluksiin, jossa tarvitaan korkeaa tarkkuutta.
2–3	Erinomainen	Tällä tasolla mittausten tarkkuudet ovat yleensä riittävät kaikkeen, paitsi kaikkein herkimpiin mittaussovelluksiin.
4–6	Hyvä	Taso, jolla voi vielä tehdä liiketoiminnallisia päätöksiä. Mittaustarkkuus riittää päätösten tekemiseen esimerkiksi reittinavigoinnissa.

7–8	Kohtalainen	Paikkaratkaisuja voidaan käyttää laskentaan, mutta paikkaratkaisua voitaisiin parantaa. Suositellaan parempaa näkyvyyttä taivaalle.
9–20	Heikko	Taso, jolla paikkaratkaisuiden voidaan olettaa olevan vain hyvin karkeita arvioita todellisesta sijainnista.
21–50	Huono	Tällä tasolla paikkaratkaisu voi olla jopa 300 metriä sivussa 6-metrin tarkkuuteen pystyvällä vastaanottimella. Paikkaratkaisu tulisi täten hylätä.

Ennen muita GNSS-järjestelmiä DOP-arvo määrittyi vain GPS-satelliittien konstellaatiosta ja mittaushetken aikana näkyvistä satelliiteista. Nykyään on jo saatavilla vastaanottimia, jotka voivat ottaa neljännen satelliitin (vastaanottimen kellobias-korjauksen) toisen GNSS-järjestelmän satelliitilta. Tulevaisuudessa nähdään enemmän vastaanottimia, jotka voivat seurata usean eri GNSS-järjestelmän satelliitteja samanaikaisesti.

3 KANTOAALTOMITTAUKSEEN PERUSTUVA PAIKANNUS

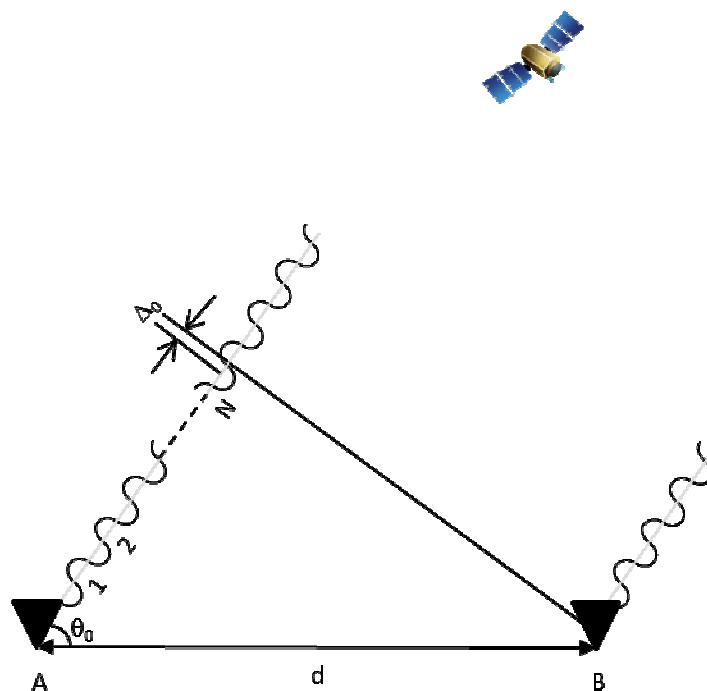
Kantaaaltomittaukseen perustuvassa paikannuksessa käytetään kahta vastaanotinta, joista toinen vastaanotin toimii tukiasemana (eng. base), ja toinen liikkuvana vastaanottimena (eng. rover). Paikannustulokset voidaan laskea reaaliaikaisesti tai jälkeinpäin näiden vastaanotinten mittauksesta. Kantaaaltomittaukseen perustuva paikannus tarvitsee huomattavasti enemmän laskentatehoa, kuin pseudoetäisyysmittauksiin perustuva paikannus. Esimerkiksi maanmittausalalla ensimmäisillä kahden vastaanottimen järjestelmillä kerättiin mittaukset laskentatehon puutteen takia vastaanottimen muistiin ja sijainti laskettiin jälkilaskentana. Nykyään saatavilla on kuitenkin riittävä laskentateho ja tarkan sijainti voidaan laskea reaaliaikaisesti. Tällainen reaaliaikainen paikannus edellyttää jatkuvaa tiedonsiirtoyhteyttä vastaanottimen ja tukiaseman vastaanottimen välillä, jotta tukiaseman korjausviestit saadaan välitettyä. (Rizos, Han 1998)

RTK-GPS (Real Time Kinematic GPS) on reaaliaikainen, suhteellinen paikannusmenetelmä, joka perustuu GPS-satelliittien pseudoetäisyysmittausten lisäksi koodisignaalin kantaaaltojen vaiheen mittaamiseen. Pseudoetäisyysmittauksista saatua paikkaratkaisua käytetään RTK-mittausten käynnistysvaiheessa. RTK-GPS vastaanottimilla päästään parhaimmillaan muutamien millimetrien tarkkuuteen.

Keskeisin haaste kantaaaltomittaukseen perustuvien etäisyyksien ratkaisemisessa on kokonaislukutuntemattomien ratkaiseminen (eng. solving integer ambiguity) ja niiden seuranta (eng. tracking). Satelliitin ja vastaanottimen välinen etäisyyden määrittäminen koodiaaltojen lukumäärää laskemalla on helpompaa kuin etäisyyden laskeminen kantaaaltojen avulla. Kantaaallot ovat toistensa näköisiä ja lyhyitä, jonka takia kantaaaltojen lukumäärän laskeminen satelliitin ja vastaanottimen välillä on vaikeaa. Tämän osion esimerkit ja yhtälöt perustuvat Misran ja Engen kirjaan *Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance*.

3.1 Toimintaperiaate: yksinkertainen malli

Ideaalitilanteessa kaksi vastaanotinta antennineen mittaavat samojen satelliittien lähettämää kantaaaltoa. Seuraavassa yksiulotteisissa esimerkissä on tarkoituksena määrittää kahden paikallaan olevan antennin vaihekeskipisteen välimatka tarkasti. Tätä välimatkaa sanotaan kantaväliksi (eng. baseline). Kuvassa 3.1 on esimerkki tilanteesta.



Kuva 3.1 Kantoaaltojen mittaaminen kahdella antennilla.

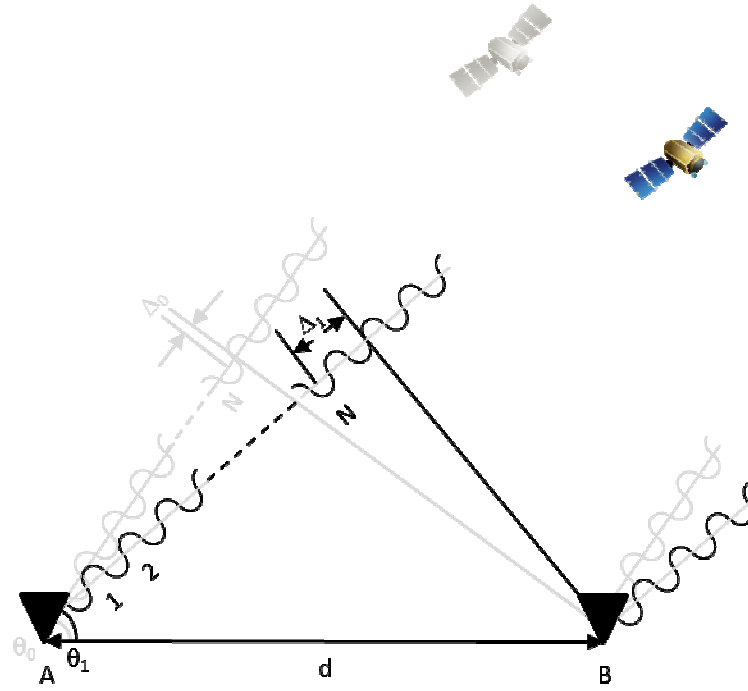
Δ_0 on ero vastaanotinten mittaamassa vaiheessa, N tuntematon kokonaisten kantoaaltojen lukumäärä, θ_0 elevaatiokulma satelliittiin ja d kantaväli kahden antennin välillä. *Paikannuksen matematiikka* kurssin luentomateriaalissa tuntematonta kokonaislukua N on kuvattu seuraavasti:

”Tilannetta voisi kuvata kellolla jossa on pelkkä sekuntiviisari: ajan muutosta pystytään seuraamaan hyvinkin tarkasti sekuntiviisarista, mutta viikonpäivästä ei ole mitään tietoa. Toisaalta jos tarkka aika saadaan joskus selville, pelkällä sekuntiviisarilla pärjätään siitä eteenpäin.” (Ali-Löytty et al. 2008)

Nähdään, että ero kahden antennin välillä on jokin määrä kokonaisia kantoaaltoja ja osa yksittäistä kantoaaltoa. Elevaatiokulma θ_0 ja vaihe-ero Δ_0 tunnetaan, jolloin tuntemattomaksi jää kokonaisten kantoaaltojen lukumäärä N . Välimatka d voidaan kirjoittaa seuraavasti

$$d = \lambda(N + \Delta_0)/\cos \theta_0 \quad (3.1)$$

Yhden mittauksen avulla on mahdotonta määrittää muuttujan N arvoa. Siksi satelliitista otetaan jatkuvasti mittauksia ja seuraavan ajanhetken tilanne on esitetty kuvassa 3.2.



Kuva 3.2 Kantoaalto mittaustilanne kahdella eri ajankohdalla.

Elevaatiokulma θ ja vaihe-ero Δ ovat muuttuneet kahden ajanhetken välillä. Vaihe-ero Δ_1 on yksittäisen kantoaallon osa, sekä mittaushetkestä 0 eteenpäin lasketut kokonaist kantoaallot. Merkitään $d_\lambda = d/\lambda$ mikä on vakio vastaanottimien ollessa paikallaan. Tällöin soveltamalla kahdesti yhtälöä 3.1 saadaan

$$d_\lambda \cos \theta_0 - N = \Delta_0 \quad (3.2)$$

$$d_\lambda \cos \theta_1 - N = \Delta_1 \quad (3.3)$$

missä tuntemattomia on kaksi, d_λ ja N . Yhtälöstä voidaan nähdä myös mittaustarkkuuden vaikutuksen ratkaisuun. Matriisimuodossa ilmaistuna yhtälöiden 3.3-4 ratkaisu voidaan kirjoittaa seuraavasti

$$\begin{bmatrix} d_\lambda \\ N \end{bmatrix} = \frac{1}{(\cos \theta_1 - \cos \theta_0)} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -\cos \theta_1 & \cos \theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_0 \\ \Delta_1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

josta nähdään, että pieni muutos ja mittaustarkkuus muuttuvat suuriksi virheiksi kertoimessa $(\cos \theta_1 - \cos \theta_0)^{-1}$. Tästä johtuen RTK-mittauksessa satelliitin tulee liikkua suhteessa vastaanottimiin havaittavasti.

Eräs yksinkertainen menetelmä saada muutos mitattuihin elevaatiokulmiin, on käyttää antennin paikanvaihtoa (Antenna swap), jolloin ensimmäisen mittauksen jälkeen antennien ja vastaanottimien sijainnit vaihdetaan päinvastaisiksi. Tällöin oletetaan, että satelliittien sijainnit eivät muutu huomattavasti vaihdon aikana ja molemmat vastaanottimet mittaavat katkotta signaalin vaihetta. Tällöin antennin B mittaamaan matkaan lisätään $d_\lambda \cos \theta_0$ ja antennin A mittaamaa matkaa vähennetään saman verran. Oletetaan, että antennin mittaama osavaihe Δ_0 on siirron jälkeen Δ_0' . Tällöin kokonaismuutos kantoaalto-mittauksessa on

$$\Delta_0' - \Delta_0 = -2d_\lambda \cos \theta_0 \quad (3.5)$$

josta edelleen saadaan ratkaistua välimatka

$$d_\lambda = \frac{(\Delta_0' - \Delta_0)}{2 \cos \theta_0} \quad (3.6)$$

Nyt yhtälöstä 3.1 saadaan edelleen ratkaistua kokonaisten kantoaaltojen lukumäärä N seuraavasti

$$N = d_\lambda \cos \theta_0 - \Delta_0 = -\left(\frac{\Delta_0' + \Delta_0}{2}\right) \quad (3.7)$$

Kantoaaltojen lukumäärän estimointiin on olemassa eri algoritmeja. Yksi tunnetuimmista on Teunissenin kehittämä LAMBDA-menetelmä (eng. Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment) (Teunissen 1995).

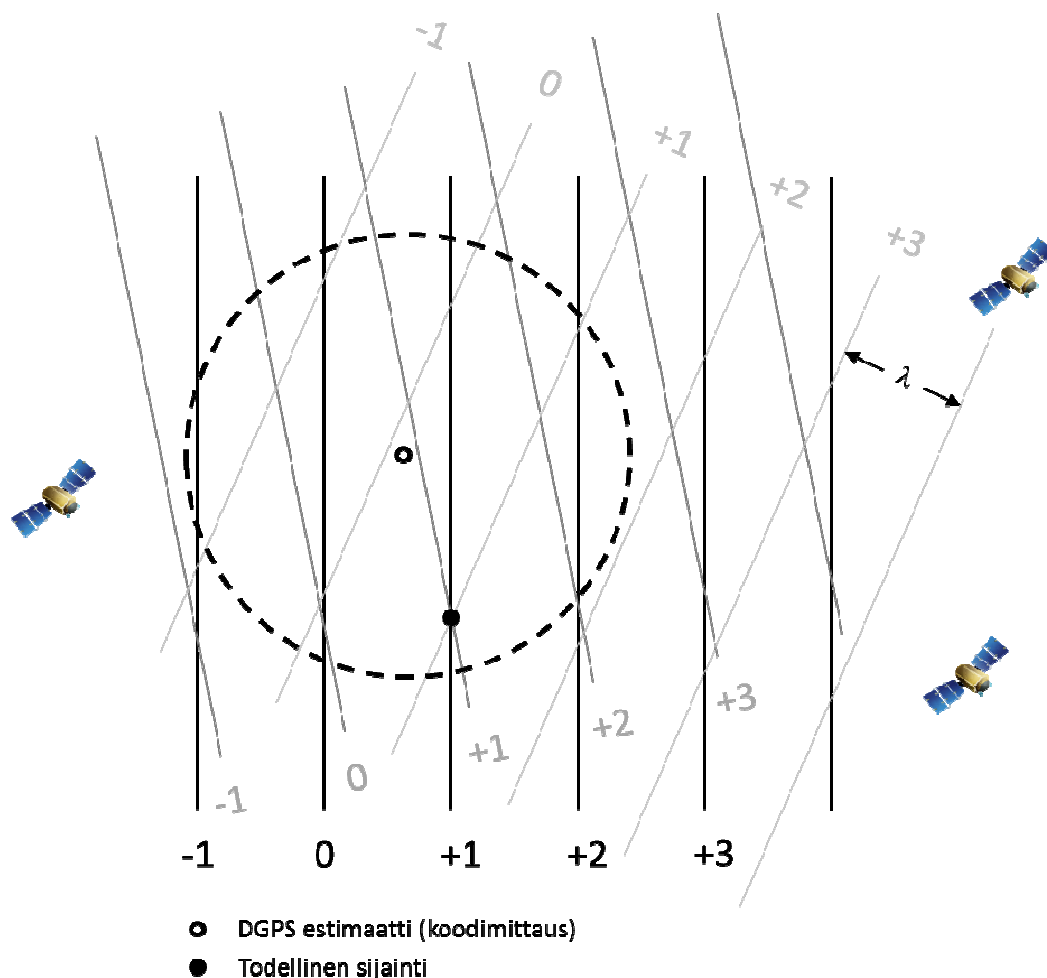
”LAMBDA-menetelmä pohjautuu ajatukseen, että pyöristysmenetelmä toimisi, mikäli kokonaislukutuntemattomat eivät olisi niin voimakkaasti korreloituneet. Syötteenä käytetään kaksoisdifferentioitujen kokonaislukutuntemattomien reaalitykettä sekä näiden kovarianssia, jotka siis saadaan esim. suodattamalla. Menetelmän kantavana voimana on lineaarinen muunnos, joka dekorreloi kokonaislukutuntemattomat mahdollisimman hyvin, ts. muunnettujen kokonaislukutuntemattomien kovarianssimatriisi on lähes diagonaalimatriisi. Tällöin hakuavaruutta voidaan huomattavasti pienentää, ja periaatteessa jos tuntemattomat saataisiin täysin dekorreloitua, löydetäisiin optimi pyöristämällä.” (Ali-Löytty et al. 2008)

Diplomityössä käytetty RTKLIB-ohjelmisto käyttää LAMBDA-menetelmää RTK-paikkaratkaisun laskemisessa. LAMBDA-menetelmä vaatii GPS-vastaanottimen SPP-algoritmia enemmän laskentaa, sekä laskenta-aikaa. Pidemmästä laskenta-ajasta johtuen, paikkaratkaisu saadaan hieman pidemmällä viiveellä joka on kuitenkin tyypillisesti alle yhden sekunnin luokkaa.

3.2 Kantoaaltomittaus useammasta satelliitista

Kokonaisten kantoaaltojen lukumäärä N tiedetään niin kauan, kun molemmat vastaanottimet saavat mitattua signaalin vaihetta. Katkos mittauksessa aiheuttaa signaalin vaihemittaukseen katkoksen, jonka seurauksena kantoaaltojen lukumäärän ei pystytä laskemaan ja mittaus joudutaan aloittamaan alusta. Katkos voi aiheutua esimerkiksi liian heikosta signaalista, hetkellisestä esteestä signaalitiellä tai heijastuneesta signaalista, jonka vastaanotin tulkitsee oikeaksi.

RTK-mittaus on aina paikannusta suhteessa valittuun vertailupisteeseen. Tällöin tukiaseman sijainnin määrittystarkkuus määrää myös tarkkuuden, jolla liikkuvan vastaanottimen absoluuttinen paikka tiedetään. Huomattava epävarmuustekijä mittauksissa on kokonaisten kantoaaltojen lukumäärän arvioinnin oikeellisuus. Kuvassa 3.3 on hahmoteltu oikean paikan löytymistä kolmen satelliitin kantoaaltomittauksesta.



Kuva 3.3 Kolmen satelliitin kanta-aaltomittaus.

Vastaanotin on saanut koodimittauksella karkean arvion vastaanottimen sijainnista koodimittaukseen perustuvalla DGPS-menetelmällä (Differential GPS). Nähdään, että kanta-aaltojen risteyskohtia mahtuu ympyrän sisälle muutamia. Käytännön RTK-mittauksissa kolmiulotteisessa ympäristössä näitä mahdollisia risteyskohtia, paikkaratkaisuja, löytyy luonnollisesti vielä useampia. Nähdään myös, että todellisen sijainnin kohdalla mittaukset risteävät täydellisesti. Todellisen sijainnin vieressä on kuitenkin muutama risteyskohta, jossa mittaukset lähes risteävät, mutta eivät täydellisesti.

Todellisen sijainnin löytäminen näistä vaihtoehdoista on hyvin haastavaa, koska ratkaisuvaihtoehtoja on useita. Todellisen sijainnin varmentamiseksi on kehitetty algoritmeja, joissa tyypillisesti vertaillaan mittauksia edellisiin mittauksiin ja lasketaan todennäköisyys sijainnin oikeellisuudelle. Esimerkiksi edellä mainittu LAMBDA-menetelmä toimii pääpiirteittäin tällä tavalla.

Kahden tai useamman mittauksen perusteella lasketaan arvioidun sijainnin ympärillä oleville paikkaratkaisuille todennäköisyysarvo, joka kuvaa ratkaisujen luotettavuutta. Jos paikkaratkaisun todennäköisyys on alhainen, sanotaan paikkaratkaisua tällöin kelluvaksi ja ei-validiksi (float). Suurimman todennäköisyyden saanut ratkaisu on paras arvaus sijainnista. Jos todennäköisyys on riittävän suuri, paikkaratkaisu on luultavasti

oikea ja tulkitaan validiksi (fix). Vastaanottimelle määritellään todennäköisyysraja, jonka perusteella se päättää onko paikkaratkaisu fix vai float. Mitä korkeammaksi rajan asettaa, sitä paremmin fix-sijaintitietoon voi luottaa. Tällöin luonnollisesti fix-ratkaisuja on vähemmän.

3.3 Häiriöiden eliminointi

Kantaaaltomittaukseen vaikuttavat häiriöt määriteltiin yhtälössä 2.4. Seuraavien yhtälöiden yksinkertaistamiseksi oletetaan monitie-etenemisestä ε_{mp} johtuva virhe, satelliitin ratavirhe d_ρ ja vastaanottimen kohinasta aiheutuva virhe ε_p hyvin pieneksi (≈ 0). Kirjoitetaan vastaanottimen r (rover) kantaaltomittaus satelliitilta k syklien lukumäärällä ilmaistuna seuraavasti

$$\phi_r^{(k)} = \lambda^{-1} \left(r_r^{(k)} - d_{ion_r}^{(k)} + d_{trop_r}^{(k)} \right) + f(dt_r - dT^{(k)}) + N_r^{(k)} + \varepsilon_{\phi,r}^{(k)} \quad (3.8)$$

missä ainut lisäys yhtälöön 2.9 on $\varepsilon_{\phi,r}^{(k)}$, joka sisältää kaikki loput mahdolliset mittavirheet, kuten antennin vaihekeskipisteen vaihtelun. Oletetaan, että vastaanottimen r lähellä on vastaanotin b (base) joka mittaa myös satelliitin k vaihetta. Sen mittausyhtälö voidaan määritellä seuraavasti

$$\phi_b^{(k)} = \lambda^{-1} \left(r_b^{(k)} - d_{ion_b}^{(k)} + d_{trop_b}^{(k)} \right) + f(dt_b - dT^{(k)}) + N_b^{(k)} + \varepsilon_{\phi,b}^{(k)} \quad (3.9)$$

Tavoitteena on eliminoida etäisyysmittausta häiritsevät satelliitin ja vastaanottimen kellobias, sekä ilmakehän aiheuttamat viivematkat. (Misra, Enge 2006)

3.3.1 Yksittäisdifferenssi

Muodostetaan vastaanottimien r ja b vaihemittausten erotus. Tätä kutsutaan yksittäisdifferenssiksi. Yksittäisdifferenssiä laskettaessa pitää ottaa huomioon mittausten eri aikaisuus. Nykyaikaisilla vastaanottimilla tiedonsiirtoviiveen vaikutus ja ero mittaushetkissä saadaan korjattua ekstrapoloimalla siten, että niiden vaikutus paikannukseen on alle 1 cm (Misra, Enge 2006). Oletetaan, että mittaukset on tehty samalla ajan hetkellä, jolloin kantaaltomittausten erotus voidaan määritellä seuraavasti

$$\phi_{rb}^{(k)} = \phi_r^{(k)} - \phi_b^{(k)} = \lambda^{-1} \left(r_{rb}^{(k)} - d_{ion_{rb}}^{(k)} + d_{trop_{rb}}^{(k)} \right) + f dt_{rb} + N_{rb}^{(k)} + \varepsilon_{\phi,rb}^{(k)} \quad (3.10)$$

Yksittäisdifferenssin avulla on nyt eliminoitu vastaanottimille yhteiset virhelähteet: satelliitin kellobias $dT^{(k)}$ ja satelliitin ratavirhe d_ρ . Ionosfäärin ja troposfäärin aiheuttamat viivematkat ovat vastaanotinkohtaisia ja riippuvat vastaanottimen ja satelliitin signaalitiellä vallitsevista olosuhteista. Kun vastaanottimet ovat lähellä toisiaan, signaalitiet ovat hyvin samanlaiset ja virheen vaikutus voidaan unohtaa. Kuitenkin ilmakehän ominaisuuksien vaihtelun mittakaava voi vaihdella suuresti, joten ei pystytä määrittämään vastaanottimien etäisyyksien rajaa, jolla tehty oletus olisi pätevä. Kantaaltomittausten yksittäisdifferenssi lyhyen peruslinjan tapauksessa voidaan siis arvioida seuraavasti

$$\phi_{rb}^{(k)} = \lambda^{-1} r_{rb}^{(k)} + f dt_{rb} + N_{rb}^{(k)} + \varepsilon_{\phi,rb}^{(k)} \quad (3.11)$$

3.3.2 Kaksoisdifferenssi ja vaihekatko

Kaksoisdifferenssillä pyritään poistamaan vastaanottimen kellobiaksen vaikutus. Siinä muodostetaan kahden vastaanottimen ja näiden mittaaman kahden satelliitin välinen erotus. Määritellään satelliitin l yksittäisdifferenssi seuraavasti

$$\phi_{rb}^{(l)} = \lambda^{-1} r_{rb}^{(l)} + f dt_{rb} + N_{rb}^{(l)} + \varepsilon_{\phi,rb}^{(l)} \quad (3.12)$$

josta saadaan nyt muodostettua vastaanottimien r ja b, sekä satelliittien l ja k erotus, eli kaksoisdifferenssi, seuraavasti

$$\phi_{rb}^{(kl)} = \phi_{rb}^{(k)} - \phi_{rb}^{(l)} = \lambda^{-1} r_{rb}^{(kl)} + N_{rb}^{(kl)} + \varepsilon_{\phi,rb}^{(kl)} \quad (3.13)$$

Kohdassa 2.8.3 mainittu vastaanottimissa oleva PL-silmukka (eng. Phase-locked loop) lukittuu satelliitin lähettämän koodisignaalin kantoaaltoon. Hetkellinen katkos saattaa aiheuttaa vaihekatkon (eng. cycle slip), joka voi olla kokonainen tai puolikas kantoaaltojakso. Kaksoisdifferenssillä vaihekatkot pystytään havaitsemaan ja ne näkyvät RTK-mittauksissa käyttäjälle yhtäkkisinä sijainnin hyppäyksinä.

3.4 Kaksitaajuusmittaus

Vaikka tässä diplomityössä sovelletaan vain yksitaajuusmittausta, esitellään myös menetelmä, kaksitaajuusmittaus, jolla RTK-mittausten suorituskykyä voidaan huomattavasti parantaa. Ilmakehässä syntyvien viiveiden arvioinnin lisäksi kaksitaajuusmittauksella voidaan parantaa kantoaaltomittaukseen perustuvaa paikanmäärittystä. Kuvan 3.3 esimerkissä voidaan yksittäisen satelliitin kantoaaltojen lukumäärää arvioida koodimittauksesta saatavan pseudoetäisyyden avulla seuraavasti

$$\phi_{L1} = \frac{r}{\lambda_{L1}} + N_{L1} + \varepsilon_{\phi,L1} \quad (3.14)$$

$$\rho_{L1} = r + \varepsilon_{\rho,L1} \quad (3.15)$$

$$N_{L1} = \left[\phi_{L1} - \frac{\rho_{L1}}{\lambda_{L1}} \right]_{\text{Roundoff}} \quad (3.16)$$

missä ϕ_{L1} on kumulatiivinen vaihemittaus, r todellinen etäisyys, N_{L1} kokonaisten kantoaaltojen lukumäärä, $\varepsilon_{\phi,L1}$ virhe vaihemittauksessa, ρ_{L1} pseudoetäisyys ja $\varepsilon_{\rho,L1}$ virhe etäisyysmittauksessa. Jos arvioidaan, että kantoaalto- ja koodivirheiden normaalijakaumien hajonta on

$$\sigma(\varepsilon_{\phi,q}^{(kl)}) \approx 0,05 \text{ sykliä}$$

$$\sigma(\varepsilon_{\rho,q}^{(kl)}) \approx 1 \text{ metri}$$

missä k ja l ovat satelliittipari ja q on lähetystaajuus L1, L2 tai L5. Nähdään, että esimerkiksi koodimittauksen virheen hajontaan mahtuu viisi L1-kantoaaltoa (L1-aallonpituus on noin 0,2 m). L2-taajuudella aallonpituus on noin 0,25 m, jolloin kantoaaltojen määrä vähenee noin yhdellä verrattuna L1-kantoaaltojen määrään. Jos vastaanotin pystyy mittaamaan L1 ja L2 taajuutta, voidaan muodostaa niiden erotustaajuus L1-L2. Tätä taajuusyhdistelmää kutsutaan nimellä ”wide lane”, jonka aallonpituus on 0,862

m. Satelliittien modernisoinnin myötä myös uusi L5 tulee mahdolliseksi. Taulukossa 3.1 on esitetty eri taajuudet ja taajuusyhdistelmät.

Taulukko 3.1. GNSS-satelliittien lähetystaajuudet ja niiden yhdistelmät.

Signaali	Taajuus (MHz)	Aallonpituus (m)
L1	$f_{L1} = 1575,42$	$\lambda_{L1} = 0,190$
L2	$f_{L2} = 1227,60$	$\lambda_{L2} = 0,244$
L5	$f_{L5} = 1176,45$	$\lambda_{L5} = 0,255$
L1-L5	$f_{L15} = 398,97$	$\lambda_{L15} = 0,751$ (medium lane)
L1-L2	$f_{L12} = 347,82$	$\lambda_{L12} = 0,862$ (wide lane)
L2-L5	$f_{L25} = 51,15$	$\lambda_{L25} = 5,861$ (extra-wide lane)

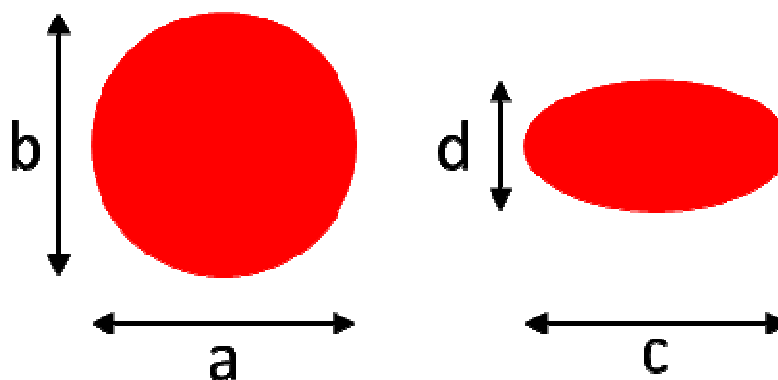
Yhdistelmätaajuuksien avulla voidaan parantaa signaalien risteyskohdan estimaattia askeleittain. λ_{L1} ja λ_{L25} suhde on noin 30-kertainen, mikä tarkoittaa RTK-mittauksissa huomattavasti pienempää määrää mahdollisia sijaintiratkaisuja. Koodimittauksesta saatua etäisyysmittausta voidaan korjata L2-L5 paikkaestimaatilla, jonka jälkeen voidaan korjata etäisyysestimaattia askeleittain päätyen lopulta lukittumaan vain signaalin L1-kantoaaltoon.

4 KOHTEEN VALINTA JA KUVAMITTAUS

Diplomityön tavoitteena on määrittää kuvassa olevan kohteen koordinaatit. Kohteen koordinaatit määritetään mittaamalla kohteen etäisyys ja suunta kuvasta sekä kameran sijainti. Kameran sijainti on lentävän kuvausalustan koordinaateista laskettu sijainti, jolloin kohteen koordinaatit ovat suhteessa tukiasemaan. Seuraavassa kerrotaan kohteen valinnasta ja menetelmästä, jolla kuvamittaukset tehdään. Lopuksi esitellään menetelmä kohteen koordinaattien laskemiseen.

4.1 Kohde

Kohteen haluttiin erottuvan kuvasta mahdollisimman helposti. Kohteen värien valinnassa otettiin huomioon kuvausympäristö. Kesäaikaan yleisin väri on vihreä ja talvella valkoinen lumi on hallitseva. Kokeilujen jälkeen päädyttiin väripariin sininen ja punainen. Muodoksi valittiin ympyrä, koska sen geometria oli helpoiten mitattavissa. Kuvassa 4.1 on hahmoteltu mittaustapaa.



Kuva 4.1 Samalta etäisyydeltä, mutta eri kulmista kuvatut ympyrät.

Vasemman puoleinen ympyrä on kuvattu kohtisuoraan, jolloin halkaisijoiden a ja b suhde on 1. Oikean puolen ympyrä litistyy ellipsiksi, kun kohde on kameraan nähden kallistunut. Halkaisijoiden c ja d suhde on kaksi, jolloin ympyrä on 45° inkliinaatiokulmassa kameraan nähden. Suurempi halkaisija määrittää etäisyyden ja pienemmän halkaisijan suhde suurempaan halkaisijaan kuvauskulman.

Yhdestä tasomaisesta ympyrästä ei saada määriteltyä inkliinaatiokulman lisäksi toista suuntaa, josta ympyrä on kuvattu eikä siten kohteen asentoa. Sen takia kohteeseen lisättiin pienempi ympyrä, jonka avulla kohteen suunta voidaan määritellä. Myöhemmissä testeissä kuitenkin huomattiin, että kohteen suuntaa ei pystytty pienemmän ympyrän

avulla mittaamaan riittävän luotettavasti, jonka takia ajatusta suunnan määrittämiseksi ei hyödynnetty tässä diplomityössä. Kohteelle pyritään määrittämään vain sijainti, ei sen asentoa. Kuvassa 4.2 on testeissä käytetty kohde ja heksakopteri.

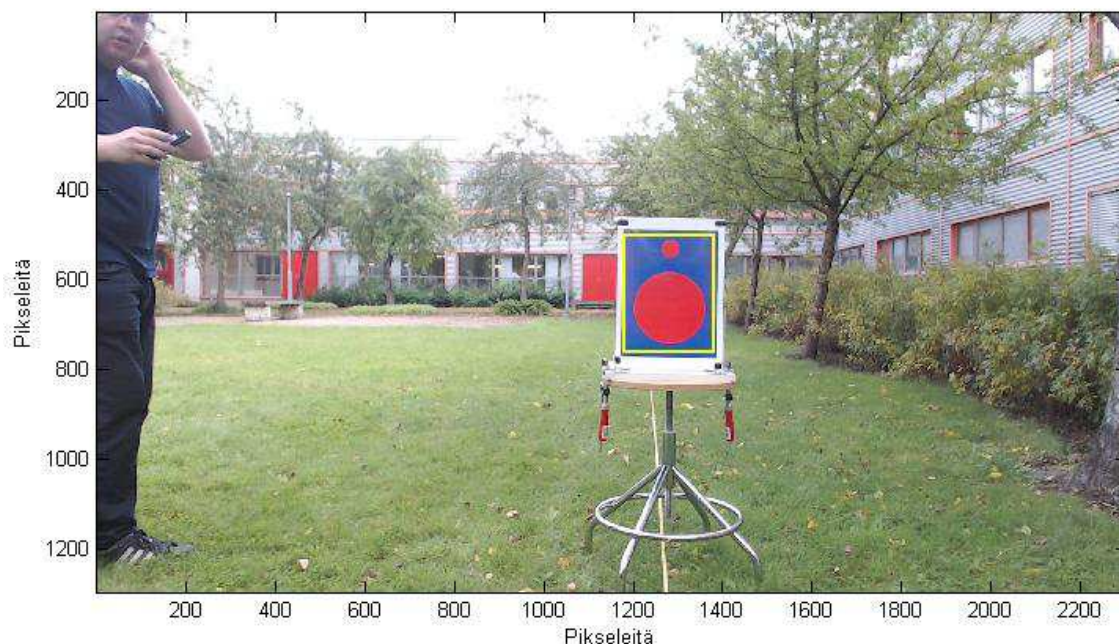


Kuva 4.2 Testeissä käytetty kuvauskohde ja heksakopteri.

Testeissä kopterissa oleva kamera on keskellä kopterin pohjaa ja se on suunnattu suoraan alaspäin. Kamera lukittiin suoraan alaspäin, koska tämä vähensi roottoreista aiheutuneiden värinöiden välittymistä kuvaan.

4.2 Pääkomponenttianalyysi, gradientti ja sovitus

Pääkomponenttianalyysi (eng. Principal Component Analysis, PCA) on data-analyysin menetelmä, jossa suuresta muuttujajoukosta pyritään saamaan pienempi joukko, joka kuvaa hyvin alkuperäisessä aineistossa esiintyvän vaihtelun. PCA:ta käytetään muun muassa värien esittämisessä, tekstuurien segmentoinnissa ja kasvojen tunnistuksessa (Bigun 2006). Tässä diplomityössä PCA-algoritmi tarkastelee värikuvien datajoukon vaihtelua 3-ulotteisessa RGB-väriavaruudessa (Red-Green-Blue). Kuvassa 4.3 on mittauksien kohde.



Kuva 4.3 Kohde 2 metrin etäisyydellä. Keltaisella suorakulmiolla merkitty alue, johon PCA kohdistetaan. Etäisyys kamerasta mitattiin maassa näkyvän 30 metrin mittanauhan avulla.

Keltaisella merkitylle suorakulmioalueelle tehdään pääkomponenttianalyysi. Pääkomponenttianalyysin algoritmi etenee seuraavasti

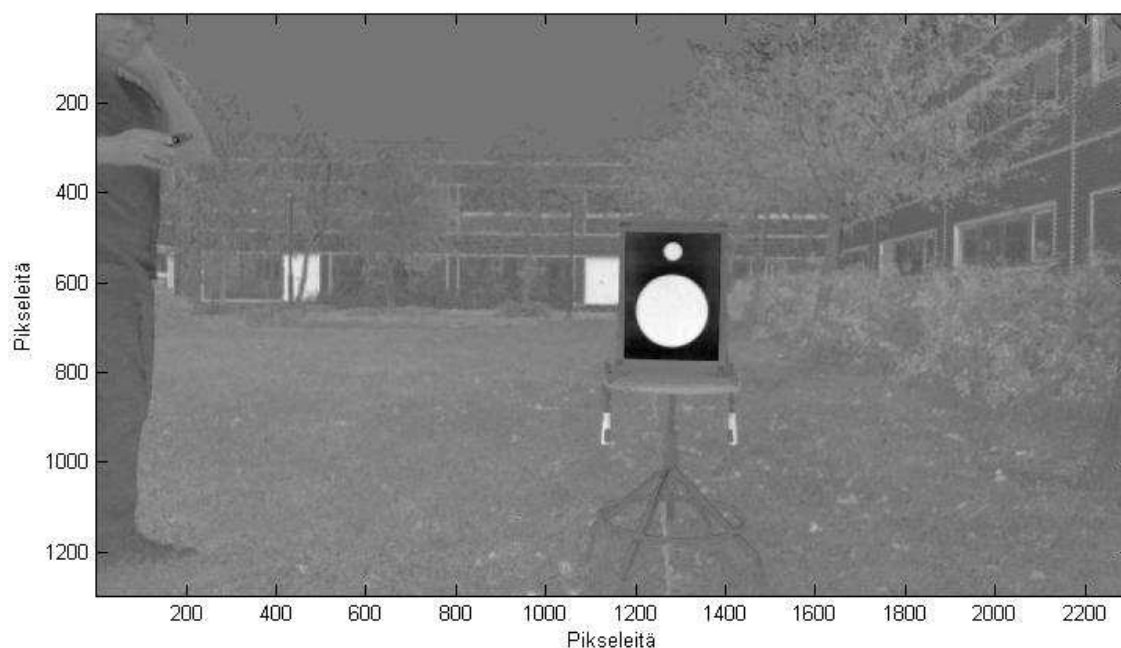
1. Lasketaan datajoukon RGB-vektoreista (kuvapikseleistä) I_i keskiarvo M
2. Lasketaan datajoukko M keskeisessä koordinaatistossa $C_i = I_i - M$
3. Lasketaan datajoukon C_i kovarianssimatriisi Q
4. Lasketaan kovarianssimatriisin Q ominaisvektorit matriisiin E ja ominaisarvot E_λ

Matriisin E ensimmäinen rivi, eli merkitsevin pääkomponentti, sisältää sen RGB-avaruuden suunnan, johon projisoituu suurin osa datan vaihtelusta. Toinen pääkomponentti sisältää suunnan, joka sisältää toiseksi suurimman osan jäljelle jääneestä vaihtelusta ja kolmas pääkomponentti viimeisen suunnan. Pääkomponentit ovat ortogonaalisia, joten niiden voidaan ajatella muodostavan uuden koordinaatiston datajoukolle. (Costa, Cesar 2001, Dryden, Mardia 1998)

Matriisin E ja E_λ arvot kuvan 4.3 keltaisen alueen sisällä olevasta RGB-kuva-avaruudesta (Red-Green-Blue) laskettuna ovat

$$E = \begin{bmatrix} 0.8115 & -0.2269 & -0.5385 \\ 0.5634 & 0.5484 & 0.6179 \\ -0.1551 & 0.8049 & -0.5728 \end{bmatrix}, E_\lambda = \begin{bmatrix} 4.688 \\ 0.119 \\ 0.007 \end{bmatrix} \times 10^8$$

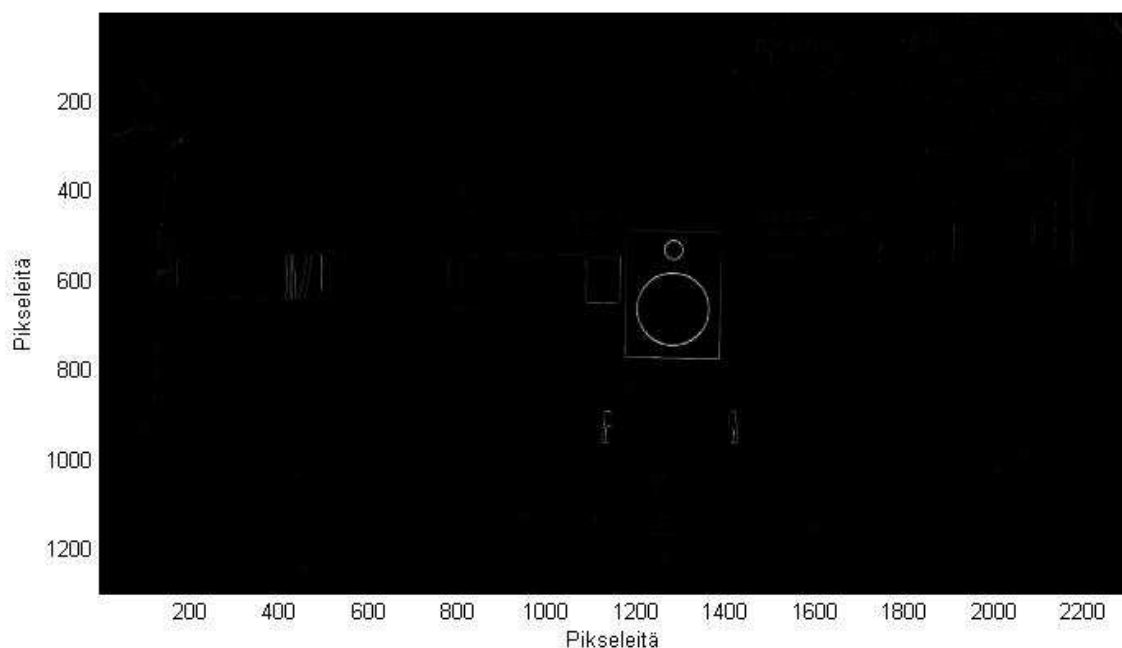
Kertomalla alkuperäinen kuva rajatun alueen ensimmäisellä pääkomponentilla, saadaan selvästi korostumaan kaksi pääväriä, punainen ja sininen. Kuvassa 4.4 kuva 4.3 ensimmäisen pääkomponentin koordinaattiarvot harmaasävyinä.



Kuva 4.4 Kuva kerrottuna rajatun alueen ensimmäisellä pääkomponentilla.

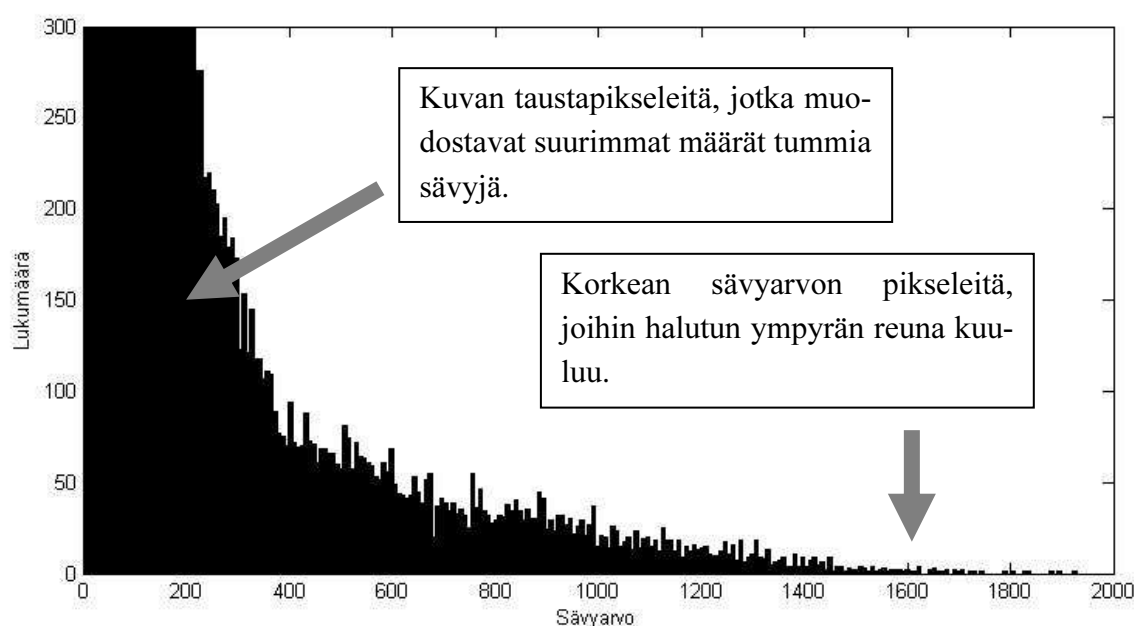
Kuvan 4.3 rajattu alue sisälsi eniten sinisen ja punaisen sävyisiä pikseleitä, jolloin niiden välille syntyy suurin ero. Kuvassa 4.4 punainen näkyy nyt lähes valkoisena ja sininen lähes mustana. Esimerkkikuvasta määritettyä pääkomponenttia voidaan käyttää nyt myös muissa kuvissa, mutta sen soveltuvuus kärsii värisävyjen muuttuessa. Valaistus vaikuttaa hyvin paljon kameran mittaamiin väriarvoihin ja kamera voi tulkita etäämmältä samat sävyt hieman erilaisiksi. Siksi kuvaushetkeksi valittiin pilvinen sää, jolloin värit toistuivat lähes saman sävyisinä kaikilla etäisyyksillä.

Tavoitteena on kohteen etäisyyden ja keskipisteen mittaaminen. Tätä varten on etsittävä suurempi ympyrä kuvasta. Ympyrän reuna voidaan hakea gradientin avulla. Gradientti kuvaa harmaasävyyn muutosnopeutta, jolloin kaikkein suurin muutos on vierekkäisten mustan ja valkoisen pikselin välillä. Kuvassa 4.5 on otettu gradientti kuvasta 4.4.



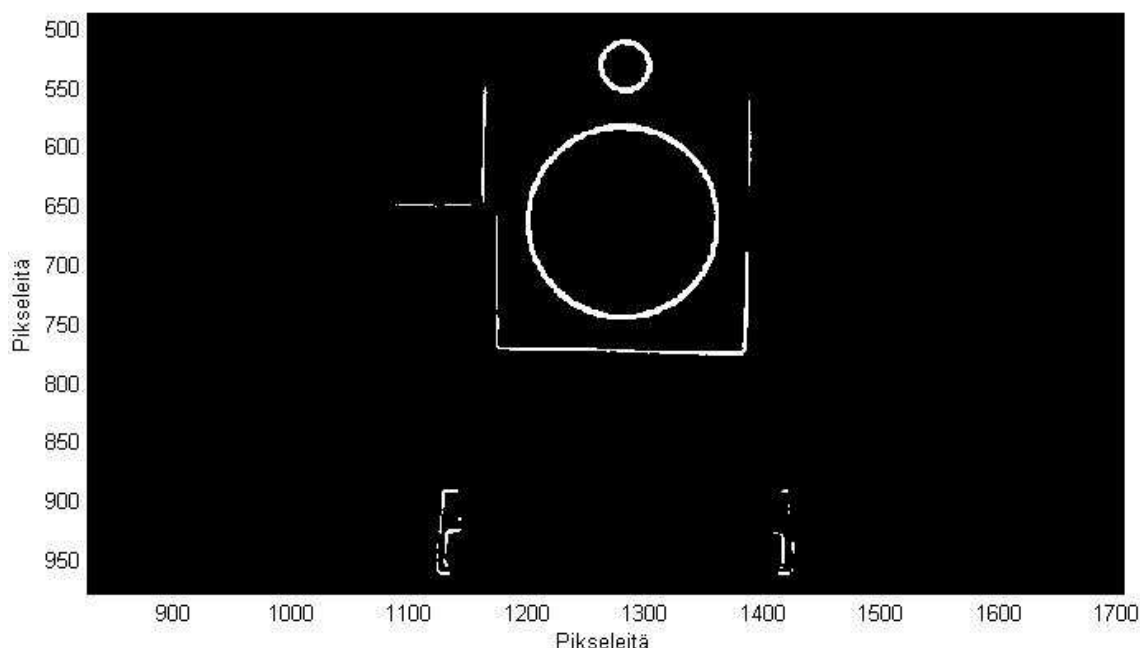
Kuva 4.5 Kuvan 4.4 gradientti.

Kaikkein vaaleimmat pikselit kuvastavat suurinta muutosnopeutta, joka syntyy nyt siis alkuperäisen punaisen ja sinisen välille. Koko kuvasta löytyy kuitenkin edelleen ei-toivottuja harmaita alueita. Histogrammin avulla voidaan asettaa raja, kuinka tummat pikselit halutaan mukaan. Kuvassa 4.6 kuvan 4.5 histogrammi.



Kuva 4.6 Histogrammi kuvasta 4.5 taustan erottavan rajan määrittämiseksi.

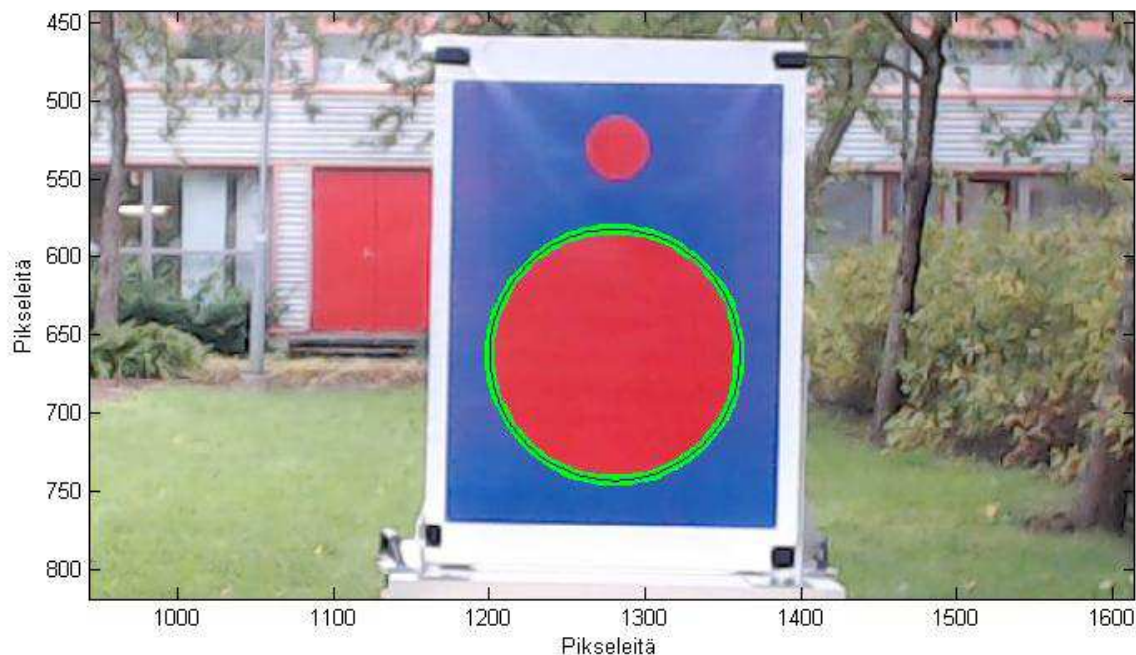
Histogrammista nähdään, että suurin osa pikseleistä on sävyraja-arvon 350 alapuolella. Jos kaikki pikselit sen raja-arvon alta asetetaan nollaksi ja sen yläpuolelta asetetaan arvoon 1, saadaan suurimmat muutosnopeudet selvästi erottumaan. Kuvassa 4.7 on gradientti, jossa raja-arvona on käytetty sävyarvoa 350.



Kuva 4.7 Raja-arvon ylittäneet pikselit ovat jäljellä. Kuvaa kohdistettu lähemmäksi.

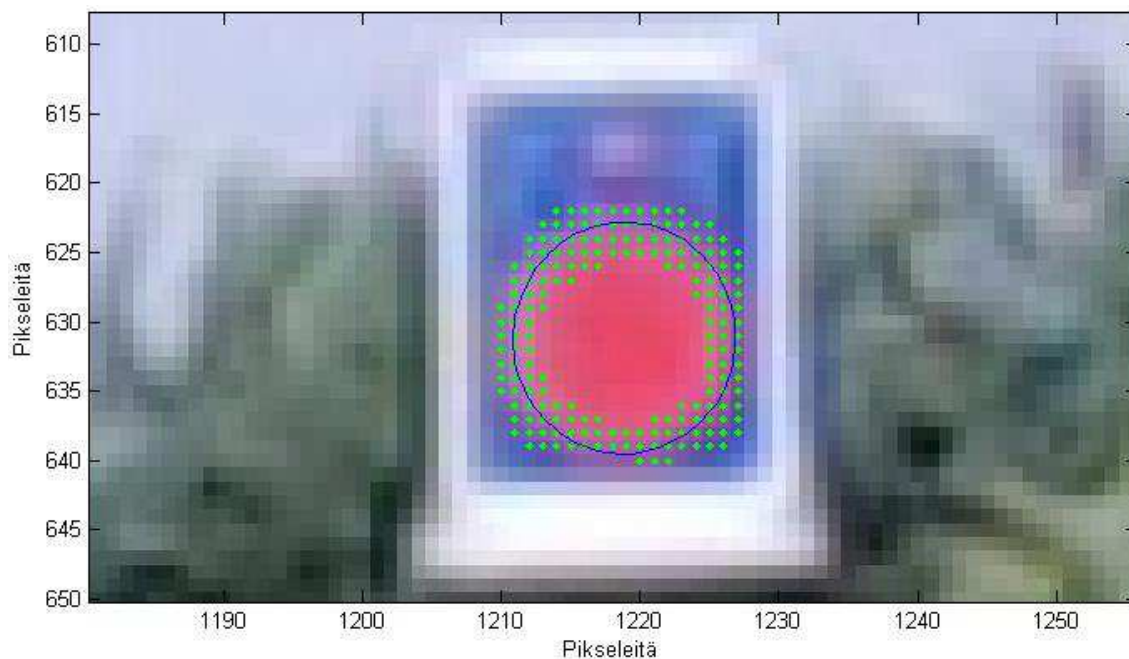
Kuvaan jää edelleen joitain ei-toivottuja alueita, esimerkiksi alkuperäisessä kuvassa 4.3 vasemmalla olevan punaisen oven reunat ja kahden kiristimen reunat kohteen alapuolella jäävät vielä näkymään. Niitä voisi edelleen yrittää poistaa nostamalla esimerkiksi sävyraja-arvoa ylöspäin. Silloin kuitenkin myös ympyrän reuna alkaisi ohentua, eikä sama raja-arvo välttämättä toimisi enää kauemmilla etäisyyksillä.

Tässä diplomityössä käytettiin valintakriteerinä suurinta yhtenäistä valkoisten pikseleiden aluetta. Tämä menetelmä toimii hyvin niin kauan kun kohteen reuna muodostaa suurimman alueen kuvassa. Kauempana esimerkiksi oven reuna saattaa muodostua kohdetta suuremmaksi, jolloin menetelmä tekee virheellisen valinnan. Lopulliseen valittuun alueeseen sovitetaan ellipsiä, jolloin päästään alipikseli-tarkkuuksiin kohteen halkaisijoiden määrittämisessä. Ellipsin pikseleihin sovittamisen jälkeen voidaan myös arvioida oliko valittu alue haetun mallinen. Kuvassa 4.8 on valitut pikselit ja niihin sovitettu ellipsi.



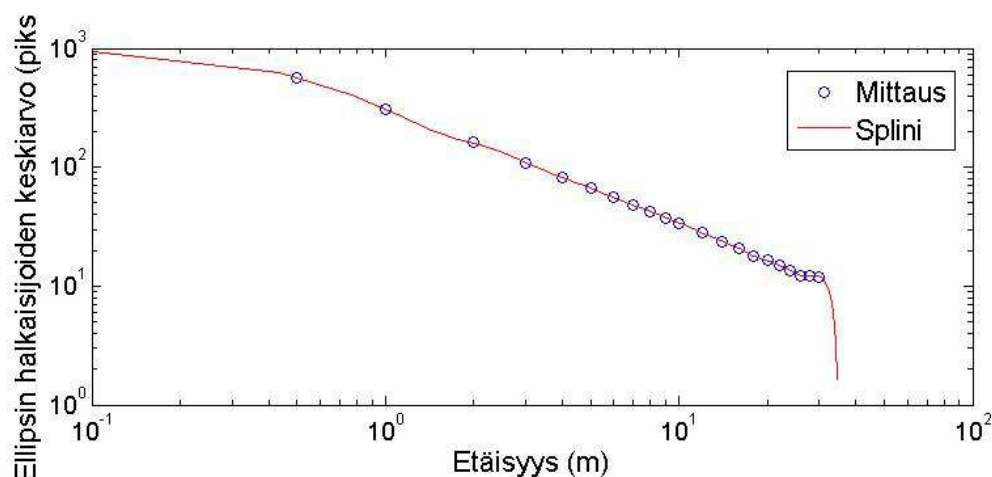
Kuva 4.8 Alkuperäinen kuva, jossa gradientista saadut pikselit merkitty vihreällä ja sovitettu ellipsi sinisellä.

Pikselien määrä luonnollisesti vaikuttaa luonnollisesti ellipsin sovituksen tarkkuuteen. Kuvassa 4.9 kohde on 20 metrin päässä kamerasta.



Kuva 4.9 Kohde 20 metrin etäisyydellä kamerasta.

Kuvissa käytetty resoluutio oli 2304*1296 pikseliä. Kuvia otettiin 0,5 metrin etäisyydeltä, 1–10 metrin etäisyydeltä 1 metrin välein ja 10–30 metrin väliltä 2 metrin välein. Tästä saatiin datasarja, johon pystyttiin sovittamaan splini. Kuvassa 4.9 on sovitettua ellipsin halkaisijoiden keskiarvo etäisyyden funktiona.



Kuvaajasta nähdään, että etäisyyden määrittäminen halkaisijan perusteella muuttuu haastavaksi mittauksen suurimmilla etäisyyksillä kun halkaisijoiden muutokset ovat pieniä. Mitä pienempi resoluutio kuvilla on, sitä lyhyempi on matka, jolta etäisyys ja sovitettun ellipsin keskipiste voidaan määrittää luotettavasti.

4.3 Virheiden arviointi

Edellä esitetty esimerkki algoritmin toiminnasta on monen iterointikierroksen tulos, jossa algoritmin parametrit on viritetty juuri kyseiselle kuvasarjalle. Sitä voidaan pitää laboratorio-olosuhteissa tehtynä kokeena. Menetelmä vaatii aina pääkomponenttiala-lyysin esimerkkikuvasta, jonka pitäisi olla tyypillinen näyte koko kuvasarjasta. Mittauk- sissa on pyritty siihen, että valaistus pysyisi tasaisena, jolloin mitatut RGB-arvot eivät muuttuisi suuresti. Myös valon heijastumiset kohteen pinnassa heikentävät menetelmän toimivuutta.

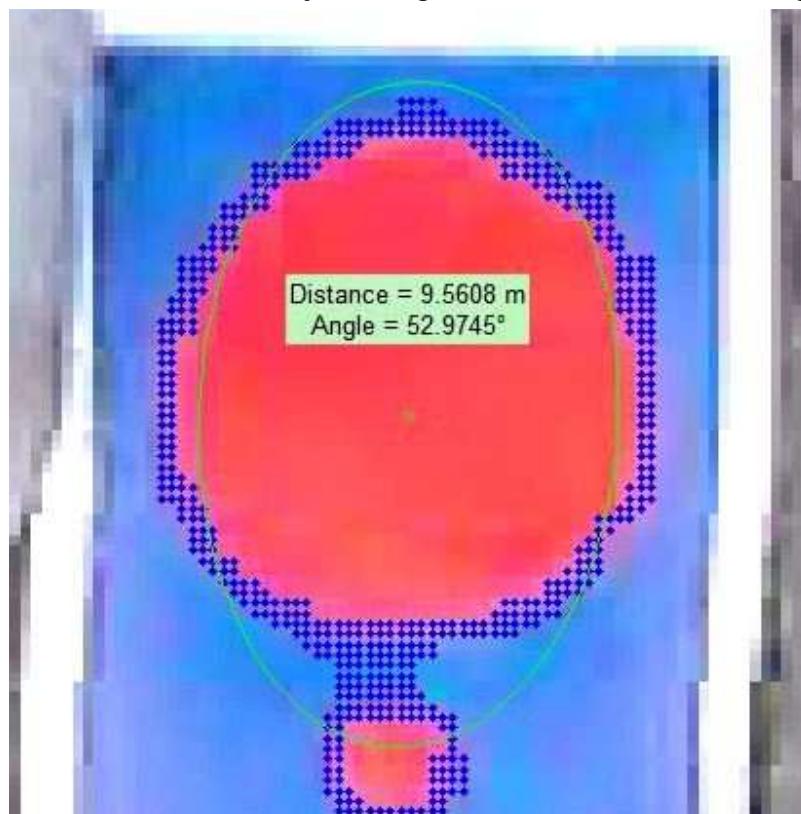
Eräs kehityssuunta voisikin olla algoritmin kehittäminen siten, että pääkomponentti- analyysi tehdään jokaiselle kuvalle. Tällöin valaistuksen muutokset päivittyisivät kuva kualta ja algoritmista tulisi robustimpi. Oikeiden pääkomponenttiarvojen edellytyksenä on kuitenkin kohteen tiukka rajaaminen kuvan 4.3 tavalla, ettei ympäristön värisävyjä tule mukaan pääkomponenttianalyysiin.

Menetelmää kokeiltiin kuvauslustralta ilmasta kuvattuun videoon. Kamera oli suun- nattu suoraan alaspäin ja heksakopteria lennätettiin kohteen yläpuolella eri korkeuksilla. Pääkomponenttianalyysi tehtiin videon kuvasta, jossa kohde oli lähimmillään kameraa ja saatiin selkeästi rajattua. Kuvassa 4.10 on yksi kuva kameran kuvaamasta videosta.



Kuva 4.10 Kohde heksakopterista nähtynä.

Kuvasta nähdään ongelma, joka havaittiin mittauksissa. Vaikka kohde ja värit ovat selvästi erotettavissa, kuva on aaltoilevaa. Epätasapaino kopterin moottoreissa ja rootto-reissa välittyä tärinänä videokuvaan, jolloin kohteen muoto on hieman aaltoileva. Toinen ongelma on pienemmän ympyrän sekoittuminen isomman ympyrän reunaan, jolloin ellipsin sovitukseseen eksyy suuremman ympyrän reunaan kuulumattomia pikseleitä. Kuvassa 4.11 on kohde suurennettuna, jossa ellipsiä on sovitettu virheellisiin pikseleihin.



Kuva 4.11 Ellipsin sovitus ympyrän kehän pisteisiin, johon on sekoittunut myös pienemmän ympyrän kehä.

Kuvasta nähdään, ettei ellipsi sijoitu isomman ympyrän kehälle, minkä vuoksi ellipsin halkaisijoista määritettävät etäisyys ja kulma ovat virheelliset. Tällaisessa tilanteessa ellipsin sovitus esimerkiksi valittujen pikseleiden sisään jääville osille saattaisi tuottaa luotettavamman tuloksen. Vaihtoehtoinen tapa lisää luonnollisesti algoritmin robustisuutta, mutta sitä ei toteutettu tässä diplomityössä.

4.4 Koordinaattien määrittäminen kohteelle

Kohteen koordinaatit määritetään WGS84-järjestelmän (eng. World Geodetic System) karttakoordinaateiksi. El-Sheimy on määritellyt väitöskirjassaan *The Development of VISAT - A Mobile Survey System For GIS Applications* (El-Sheimy 1996) mallin halutun pisteen koordinaattien määrittämiseksi kameran kuvasta. El-Sheimyn mallissa kohteen sijainti muutetaan kameran koordinaatistossa mitatusta vektorista r_i^c , karttakoordinaatiston vektoriksi r_i^M seuraavasti

$$r_i^M = r(t)_{GPS}^M - R_b^M(t)R_c^b(r_{GPS}^c - s_i r_i^c) \quad (4.1)$$

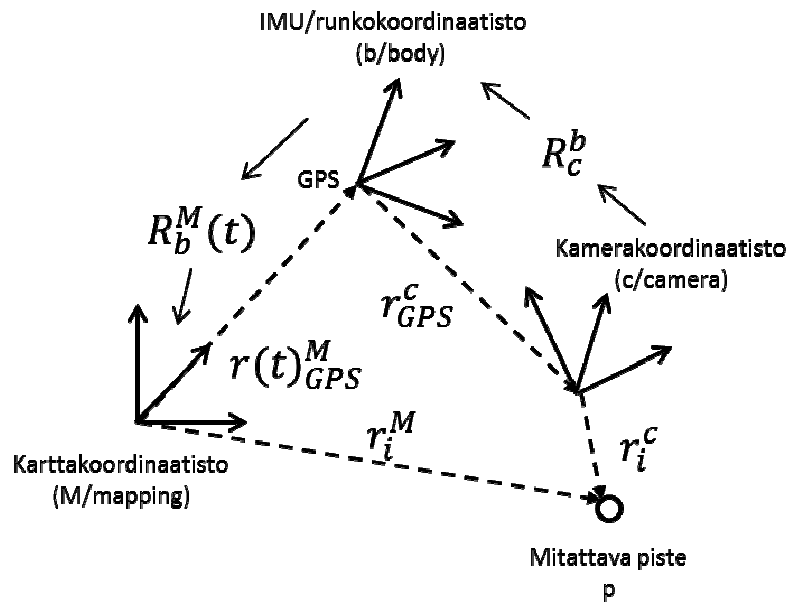
jossa ajan hetkellä t , r_{GPS}^M on GPS antennin sijainti karttakoordinaatistossa, R_b^M on rotaatiomatriisi kuvausalueen runkokoordinaatistosta muuntamiseksi karttakoordinaatistoon, R_c^b on rotaatiomatriisi kamerakoordinaatiston muuntamiseksi runkokoordinaatistoon, r_{GPS}^c on vektori GPS antennista kameran perspektiivin keskustaan ja s_i on skaalauskerroin kuvasta saadulle vektorille r_i^c . Rotaatiomatriisit kuvaavat kahden vektorin välisen kierron. Rotaatiomatriisi R_b^M määritellään Euler-kulmien avulla seuraavasti

$$\begin{aligned} R_b^M &= R_x R_y R_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \phi - \sin \psi \sin \theta \sin \phi & -\sin \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \phi - \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ -\cos \theta \sin \phi & \sin \theta & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \end{aligned}$$

missä ϕ on kierto y-akselin ympäri (roll), θ on kierto x-akselin ympäri (pitch) ja ψ on kierto z-akselin ympäri (yaw). Yhtälön 4.1 rotaatiomatriisit R_b^M ja R_c^b ovat matriisien R_x , R_y ja R_z tuloja jolloin yhdellä rotaatiomatriisilla saadaan kuvattua kierrot koordinaatiston kaikkien kolmen akselin ympäri.

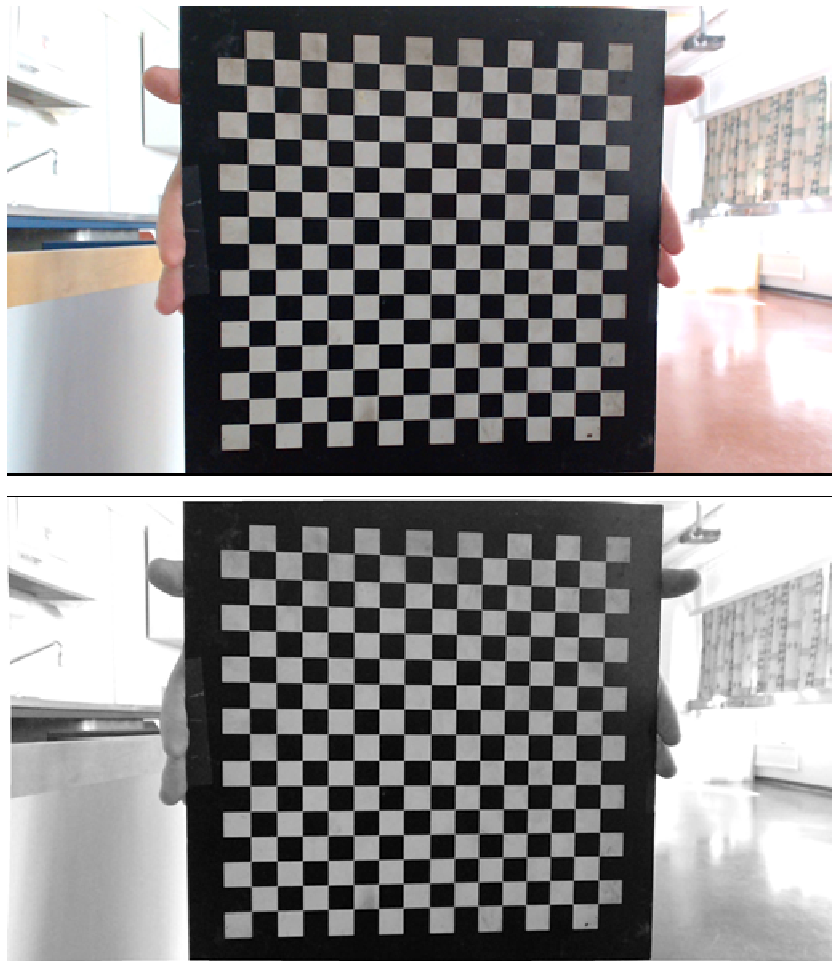
Hassan ja El-Sheimy ovat määritelleet kolme järjestelmäkalibrointia, jotka on tehtävä ennen muunnoksen 4.1 soveltamista. Rotaatiomatriisi R_c^b muodostetaan ”boresight”-kalibroinnin tuloksien perusteella. ”Boresight”-kalibrointi määrittää kameran koordinaatiston ja runkokoordinaatiston välisen rotaatiomatriisin. ”Leverarm”-kalibrointi määrittää GPS-antennin vaihekeskipisteen ja kameran perspektiivin keskipisteen välinen suhteellinen sijainti. Kamerakalibroinnilla korjataan kameran linssin aiheuttamat vääristymät. (El-Sheimy 1996, Hassan, El-Sheimy 2002)

Kuvassa 4.12 on yhtälön inertia-antureiden, GPS antennin ja kameran koordinaatistojen suhteet.



Kuva 4.12 Koordinaatistomuunnokset El-Sheimyn mallin mukaan.

Järjestelmän komponenttien suhteellisten sijaintien kalibrointi on edellytys tarkoillemittaustuloksille. Tässä diplomityössä koko järjestelmää ei voitu kalibroida perusteellisesti. Kamera kuitenkin kalibroitiin. Kuvassa 4.13 on esitetty alkuperäinen ja kalibroinnin jälkeinen kuva.



Kuva 4.13 Alkuperäinen (ylempi) ja oikaistu (alempi) kuva.

Yllä olevissa kuvissa on kalibroinnissa käytetty ”shakkilauta”, johon sovellettiin Bouguet’n kehittämää kamerakalibrointia (Bouguet 2010). Ylempi kuva on alkuperäinen ja alla on kalibroinnin jälkeen saatujen kameraparametrien avulla oikaistu harmaasävykuva. Alemmassa kuvassa näkyy hieman tyynyvääristymää: kaikki kuvan reunat ovat taittuneet hieman sisäänpäin. Tässä työssä tyynyvirheen vaikutusta ei kuitenkaan ole huomioitu tulosten laskennassa, koska siitä aiheutuvan virheen vaikutuksen nähtiin olevan pieni.

5 TESTILAITTEET JA OHJELMISTO

Diplomityön käytännön kokeissa käytettiin maarobottia ja heksakopteria, joka toimi lentävänä kuvausalustana. Tässä osiossa esitellään lyhyesti testien laitteet ja ohjelmisto.

5.1 Maarobotti

Maarobotti on Robotnik -yhtiön Summit -robottia. Se on nelipyöräinen radio-ohjattava auto, jonka sisällä on tietokone. Robottia voidaan ajaa kauko-ohjaimella tai se voidaan ohjelmoida toimimaan autonomisesti. Se on suunniteltu sekä sisä- että ulkotiloihin ja siihen voidaan liittää lisälaitteita. Kuvassa 6.1 robottiin on kiinnitetty GPS-antenni ja radiolinkki mittauksia varten.

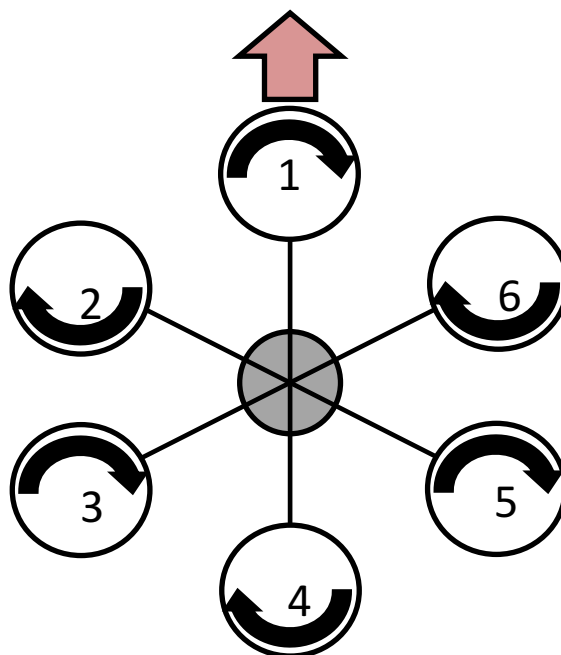


Kuva 5.1 Summit -robotti mittauskäytössä.

Maarobottia käytettiin pääasiassa antennien testaamiseen liikkeessä. Antenneja olisi voitu kokeilla myös liikutteleamalla niitä kädellä, mutta robotin avulla haluttiin minimoida ihmisen kehosta aiheutuvien heijastumien ja signaalien vaimenemisen vaikutus mittauksiin. Maarobotin avulla mittaukset pystyttiin tekemään usean metrin etäisyydeltä antennista.

5.2 Heksakopteri

Heksakopteri on kuusiroottorinen helikopteri, joka on mekaniikaltaan hyvin yksinkertainen. Kopteri on sähkökäyttöinen ja sen moottorit ja propellit ovat tyypillisiä lennokitarvikkeita. Kopteri vakautetaan inertia-antureista saatujen mittausten avulla. Kuvassa 5.2 on esitetty heksakopterin toimintaperiaate.



Kuva 5.2 Heksakopterin roottoreiden pyörimissuunnat.

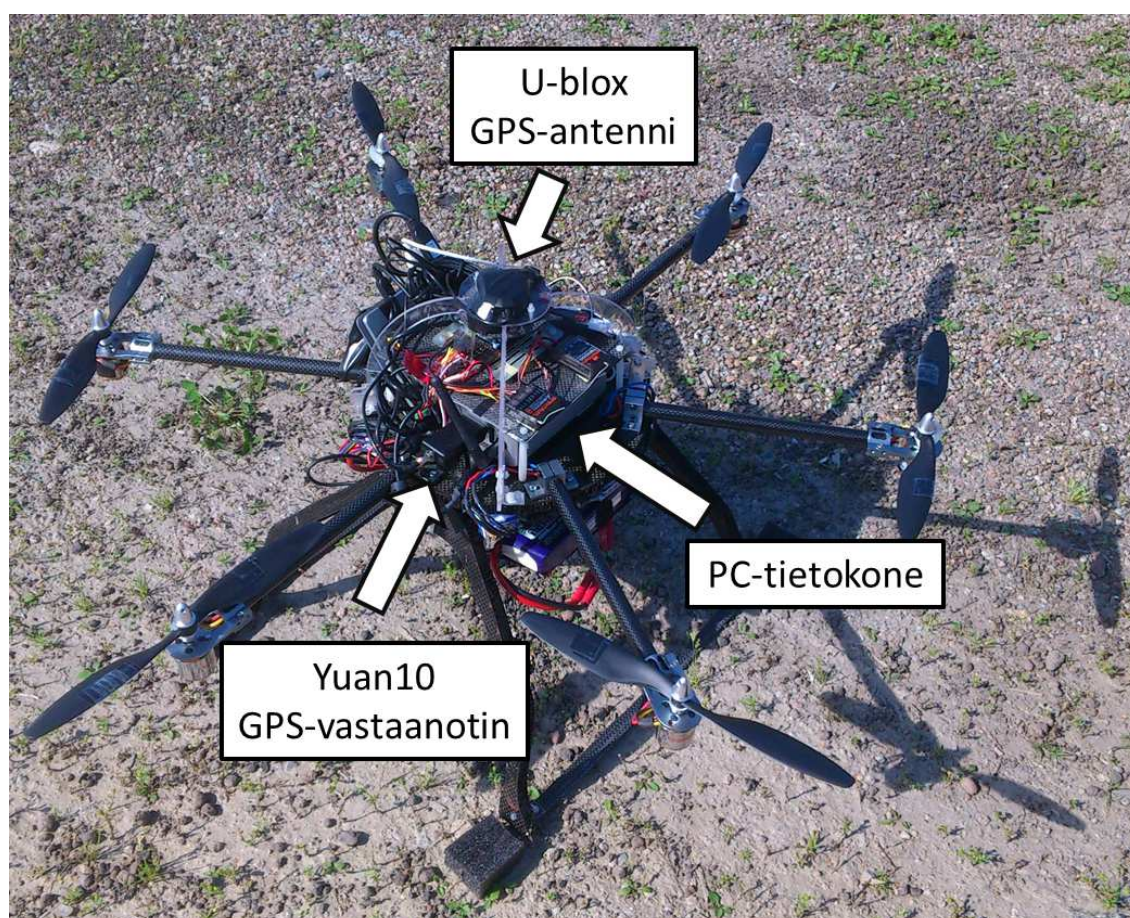
Heksakopterin propellit ovat kiinteälapakulmaisia, ja heksakopteria ohjataan moottorien kierrosnopeuksia muuttelemalla, jolloin yksittäisten roottoreiden nostavaa voimaa pystytään muuttamaan. Esimerkiksi punaisen nuolen suuntaan lähdetessä kopteri saadaan kallistumaan vähentämällä moottoreiden 1,2 ja 6 kierroksia ja lisäämällä moottoreiden 3,4 ja 5 kierroksia.

Myötä- ja vastapäivään pyörivistä moottoreista aiheutuvan väännön tulee olla yhtä suuri molempiin suuntiin. Useimmiten multiroottoreissa käytetäänkin parillista määrää moottoreita jolloin vääntövoimat kumoavat toisensa. Hallitsemalla vääntövoimaa kopteriin saadaan kolmas ohjaussuunta eli kierto (eng. yaw), jolloin kopteri pyörii kuvan 5.2 lävistävän akselin ympäri. Kierto-ohjaus saadaan muuttamalla eri suuntiin pyörivien moottoreiden nopeussuhdetta. Pelkkä yhteen suuntaan pyörivien moottoreiden kierrosten laskeminen aiheuttaisi samalla myös nostavan voiman vähenemisen, jolloin kiertävän liikkeen aikana kopteri menettäisi samalla korkeutta. Vastaavasti pelkkä kierrosten lisääminen toisi lisää korkeutta. Jos esimerkiksi halutaan kopterin kiertävän oikealle, myötäpäivään pyöriviä moottoreita hidastetaan ja vastapäivään pyöriviä moottoreita nopeutetaan.

Heksakopterin itse suunniteltu runko on suurimmaksi osaksi tehty hiilikuidusta. Lentoelektroniikkana on Arducopter mikro-ohjainalustaa, johon on kytketty sensorialusta. Sensorialustassa on 3-akselinen gyroskooppi, 3-akselinen kiihtyvyysanturi, 3-

akselinen magnetometri, barometri, ja ultraäänianturi. Gyroskoopin, kiihtyvyysanturin ja magnetometrin avulla kopterin saadaan pidettyä vakaana. Gyroskoopin mittausten valuminen (Gyro drift) korjataan magnetometrin avulla. Magnetometrin heikkous on sen alttius magneettikentän muutoksille. Mittausvirheitä syntyy, jos ympäristössä on vahva magneettikenttä.

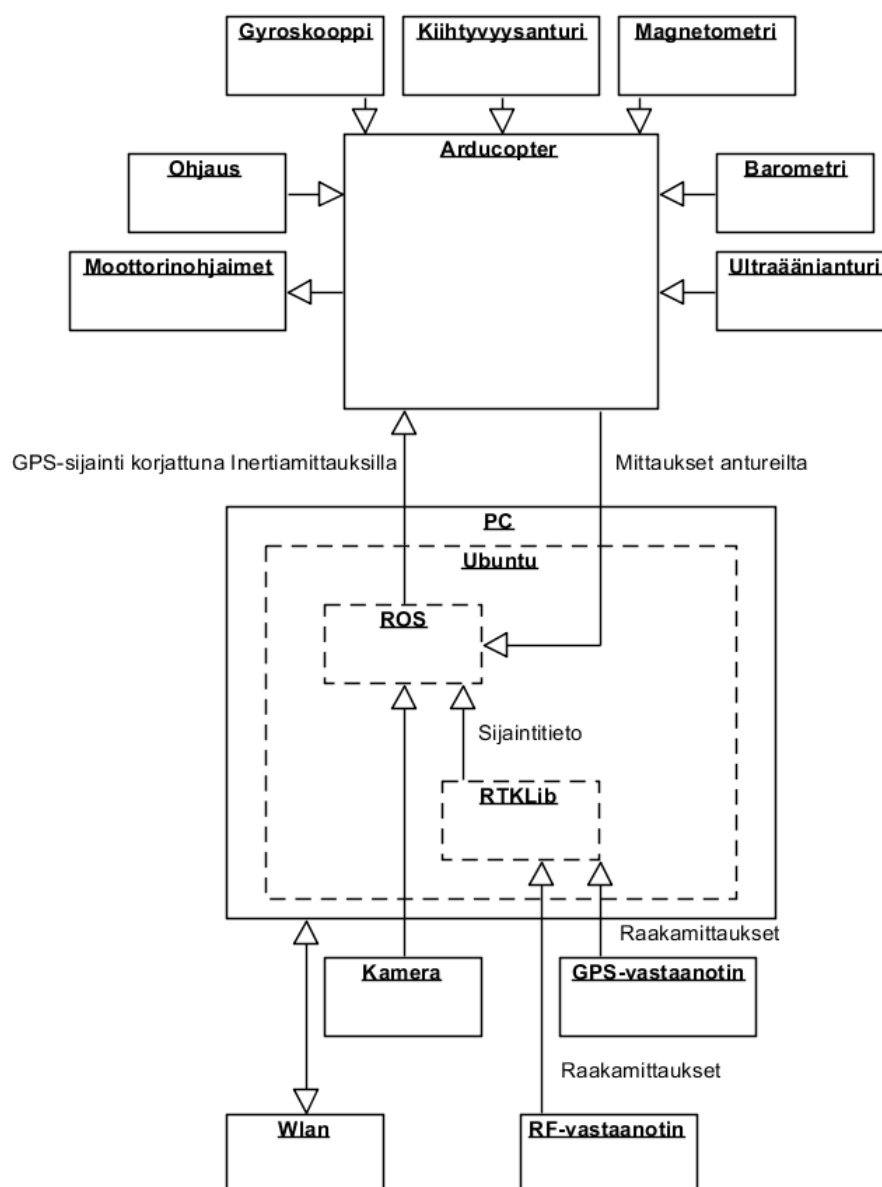
Kopterin korkeus mitataan barometrin ja ultraäänianturin avulla. Ultraäänianturi on suunnattu suoraan alaspäin ja se on tarkempi kuin paineanturi korkeusmittauksissa, mutta sen kantomatka on tyypillisesti maksimissaan 6-10 metriä. Ultraäänianturin ja barometrin mittaukset yhdistetään painottamalla. Korkeuden ollessa 0-4 metriä, käytetään vain ultraäänianturin mittauksia ja yli 6 metrin korkeudella käytetään vain barometrin mittauksia. Antureiden mittausten painotukset muuttuvat lineaarisesti 4-6 metrin välillä. Kuvassa 5.3 on heksakopteri varustuneen.



Kuva 5.3 Mittauksissa käytetty heksakopteri.

Heksakopterissa on lentoelektroniikan lisäksi pieni PC-tietokone, jonka käyttöjärjestelmä on Linux-pohjainen Ubuntu. Tietokone laskee RTK-paikkaratkaisun ja välittää sen lentoelektroniikalle. Tietokoneen avulla on myös mahdollista yhdistää inertiantureiden mittaukset GPS-mittauksiin, jolloin esim. GPS-paikkaratkaisun viivettä saadaan kompensoitua ennustamalla sijaintia GPS-viiveen verran tulevaisuuteen. Tietokoneeseen on asennettu ROS (Robot Operating System), jonka avulla tallennetaan kaikki mittaukset ROS-järjestelmän kellonajalla leimattuina. ROS mahdollistaa myös kommu-

nikoinnin muiden robottien, kuten maarobotin kanssa. Kuvassa 5.4 on kuvattu heksakopterin eri komponenttien ja ohjelmistojen arkkitehtuuria.



Kuva 5.4 Heksakopterin järjestelmäarkkitehtuuri.

Arducopterin ja PC:n väliset yhteydet toimivat sarjaporttiyhteyksien kautta. Kamera ja GPS-vastaanotin on kytketty PC:hen USB-yhteydellä (Universal Serial Bus). Arkkitehtuurista nähdään, että PC:n sammuminen ei sammuta heksakopterin lentoelektroniikkaa, koska PC vain tuottaa korjattua GPS-sijaintitietoa. Tämä luonnollisesti lisää järjestelmän luotettavuutta.

Kuvasta tunnistetun kohteen koordinaatit määritettäisiin ROS:ssa. Tässä työssä koordinaattien määrittäminen kohteelle on kuitenkin suunniteltu tehtävän jälkilaskentana eikä varsinaista reaaliaikaista sovellusta kehitetty.

5.3 RTKLIB-ohjelmisto

RTKLIB (RTK library) on avoimeen lähdekoodiin perustuva ilmainen ohjelmistokirjasto. Sen on kehittänyt Tomoji Takasu:n ohjaama ryhmä Tokyo University of Marine Science and Technology:ssa, satelliittinavigoinnin laboratoriossa. Ohjelmisto tukee tällä hetkellä GPS-, Glonass-, QZSS- ja SBAS-satelliiteista tehtäviä mittauksia. Paikannus voidaan tehdä reaaliaikaisesti tai jälkikäteen vastaanottimien tallennetusta datasta. Ohjelmistossa on joukko paikannusmenetelmiä, joista tässä on keskitytty kuitenkin vain reaaliaikaiseen ja jälkilaskentana tehtyihin RTK-mittauksiin, sekä yleisesti käytettyyn single-point menetelmään, joka määrittää paikan vain pseudoetäisyyksien perusteella. Ohjelmiston algoritmit on kuvattu tarkemmin julkaisussa ”Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB”. (Takasu, Yasuda 2009)

5.4 Vastaanottimet ja antennit

Vastaanottimet valittiin siten, että RTKLIB-ohjelmistossa oli niiden valmis tuki. Läheskään kaikki vastaanotinpiirit eivät anna vastaanottimen RF-osan ”raakamittauksia” ulos, vaan esimerkiksi vain lopullisen paikkaratkaisun. RTK-mittaus tarvitsee vaihemittauksen, jotta laskenta pystytään tekemään.

GPS-antenneista kokeiltiin kolmea eri mallia, jotta löydettiin projektiin sopivin antennimalli. Kaksi kokeiltua antennia olivat ns. patch-antenneja. Saku Lahti on kurssimateriaalissaan kirjoittanut: ”Patch-antennit ovat maatasen päällä olevia tasomaisia antennia ja niissä käytetään korkean permittiivisyyden omaavia eristemateriaaleja (käytännössä keraameja) jolla antennin fyysistä kokoa saadaan pienennettyä” (Lahti 2008).

5.4.1 Yuan10 GPS-vastaanotin

Vastaanottimiksi valittiin Yuan10 mallinimellä olevat vastaanottimet, joita valmistaa OneTalent GNSS -yritys. Vastaanottimessa on Skytraq piirivalmistajan S1315F-RAW vastaanotinpiiri ja FTDI FT232RL USB-sarjaliikenne-mikropiiri. Kuvassa 5.6 on kuva vastaanottimesta ilman kotelointia.



Kuva 5.5 Yuan10 vastaanotin Skytraq S1315F-RAW piirillä (Onetalent GNSS 2012).

Vastaanottimesta saadaan mittauksia joko 1,5,10 tai 20 Hz taajuuksilla. Se on lisäksi hyvin kevyt, mikä on eduksi heksakopterin kuormarajoitteiden kannalta. Vastaanotinpiirissä on 65 L1-taajuuden kanavaa ja sen signaaliherkkyys on -161 dBm.

5.4.2 GPS-antenni V.Torch VTGPSIA-3

V.Torch:n GPS-antenni VTGPSIA-3 on ns. aktiivinen antenni, jossa on sisäänrakennettu vahvistin. Antennissa on keraaminen antennielementti ja se on tarkoitettu koteloitavaksi. Kuvassa 5.7 on esitetty antenni noin 10 cm kaapelin ja SMA-liittimen kanssa.



Kuva 5.6 V.Torch VTGPSIA-3 GPS-antenni ja Yuan10-vastaanotin.

Antenni otettiin kokeiluun, koska se kokonsa ja painonsa puolesta sopii hyvin heksakopterin kyytiin. Lisäksi antennivahvistimen käyttöjännite oli sopiva vastaanottimille.

5.4.3 GPS-antenni U-blox ANN-MS

U-blox valmistajan ANN-MS GPS-antenni on aktiivinen patch-antenni. RTKLIB-ohjelmiston kehittäjä oli testannut antennin toimivuutta, minkä takia se valitsemaan yhdeksi antennivaihtoehdoksi. Kuvassa 5.8 on ANN-MS GPS-antenni ja Yuan10-vastaanotin.



Kuva 5.7 U-blox ANN-MS GPS-antenni ja Yuan10-vastaanotin.

Antenni on koteloitu ja siinä on magneetti, jolla se kiinnitetään metallipintaan. Lisäksi antennissa on 5 metrin mittainen kaapeli SMA-liittimellä. Antennia suunniteltiin käytettäväksi tukiasemassa, mutta kokonsa puolesta sitä olisi mahdollista käyttää myös heksakopterissa. Heksakopteriin asennettaessa antennista kuitenkin jouduttiin poistamaan magneetti, jotta kopterin magnetometri toimisi oikein. Lisäksi antennikaapelia lyhennettiin painon vähentämiseksi.

5.4.4 GPS-antenni NovAtel GPS-702-GG

NovAtel on yksi suurimmista satelliittipaikannus- ja -navigointi-alan valmistajista. Työhön saatiin lainaksi Tampereen teknillisen yliopiston tietokonetekniikan-laitokselta vertailuantenniksi NovAtel GPS-702-GG, joka perustuu NovAtelin patentoimaan Pinwheel-antenniteknologiaan. Pinwheel-teknologialla on pyritty heijastuneiden satelliittisignaalien hyvään vaimennukseen (monitie-eteneminen) ja vakaaseen antennin vaihekeskipisteeseen. Kuvassa 5.9 GPS-702-GG antenni.



Kuva 5.8 NovAtel GPS-702-GG antenni (NovAtel 2006).

Antenni on suunniteltu taajuuskaistoille L1 ja L2, ja sillä voi vastaanottaa myös Glonass-satelliittien signaaleja. Tämä antenni ei sovellu heksakopterin kyytiin kokonsa ja painonsa takia, mutta sen käyttöä tukiasema-antennina tutkittiin.

5.5 Kamera

Heksakopterin kuormarajoitusten takia kameran paino oli olennainen valintakriteeri. Kameraksi valittiin Logitech C-920, joka on kuluttajakäyttöön tarkoitettu web-kamera. Kuvassa 5.5 on esitetty Logitech C-920 web-kamera.



Kuva 5.9 Logitech C-920 web-kamera (Logitech 2012).

Kameralla saadaan otettua sekä yksittäisiä kuvia että nauhoitettua videota. Kuvat ja video tallennetaan maksimissaan 1920*1080 pikselin resoluutiolla, joka oli riittävä ensimmäisiin kuvamittaussovelluksiin. Lisäksi kamerassa on automaattinen tarkennus. (Logitech 2012)

6 MITTAUSTULOKSIA

Tässä osiossa esitetään kokeet, joiden perusteella valittiin sopivimmat antennit. Lisäksi arvioidaan ja esitellään RTK-GPS:n toimivuutta. Sen jälkeen esitellään kuvamittauksen tuloksia eräältä testilennolta. Lopuksi arvioidaan tarkkuus, jolla koordinaatit saadaan laskettua kuvasta tunnistetulle kohteelle.

6.1 Käytettävien antennien valinta

Ensimmäiset testattavat antennit olivat V.Torch VTGPSIA-3 ja U-blox ANN-MS. Antennien kohinaa vertailtiin tekemällä mittaukset rinnakkain kahdella vastaanottimella samanaikaisesti. Kuvassa 6.1 mittausjärjestely.



Kuva 6.1 Mittausjärjestely V.Torch ja U-blox antennille.

Lisäksi kokeiltiin ohuen metallisen aluslevyn vaikutusta paikkaratkaisun vaihteluun. Aluslevyllä pyrittiin estämään antennin alapuolelta heijastuneet signaalit ja vahvistamaan vastaanotettuja näköakselin signaaleja. Aluslevy oli n. 20 cm halkaisijaltaan oleva pyöreä metallinen levy, joka oli maadoitettu vastaanottimeen. Halkaisijan pituus valittiin siten, että se olisi vähintään yli aallonpituuden. L1-taajuuden aallonpituus on n. 19 cm.

Taulukossa 6.1 on esitetty testin mittaustuloksia. Mitatut koordinaatit on ensin muutettu lokaaliin ENU-koordinaatistoon josta varianssit on laskettu. Paikka ratkaistiin SPP-algoritmilla. Mittauksen kesto oli 484 sekuntia. Varianssit on laskettu jaksolla 100–484 s, jotta vastaanottimien paikkaratkaisun vaihtelu alussa ehti tasoittua ennen varianssien laskemista.

Taulukko 6.1 Vertailu sijainnin variansseista. Pienimmät varianssit korostettuna.

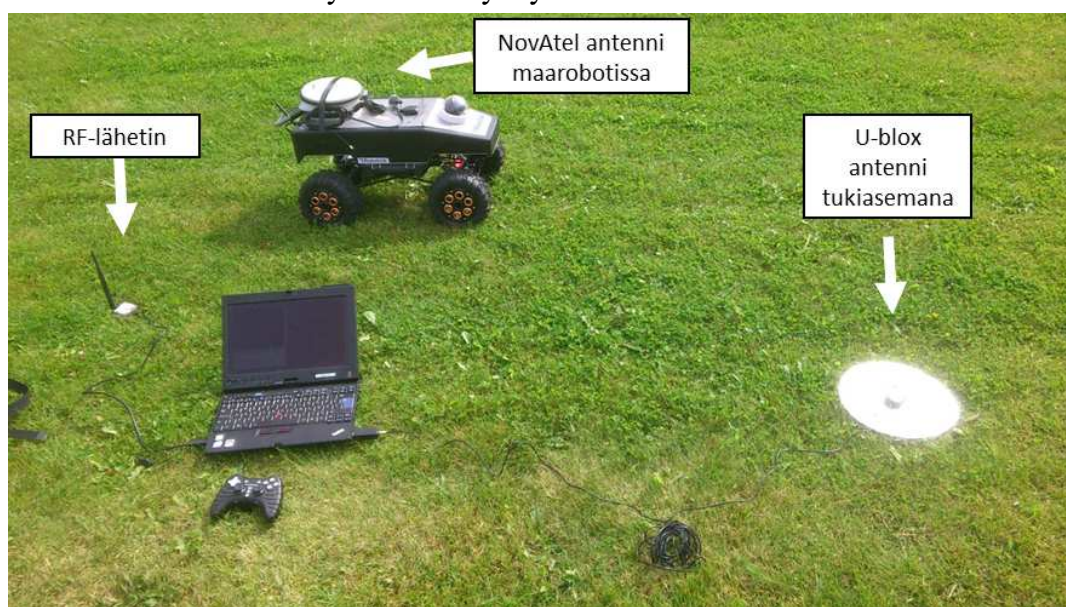
Varianssit eri suuntiin.	Ilman aluslevyä (m)	Aluslevyn kanssa (m)
V.Torch VTGPSIA-3		
Itä-länsi	4.89	3.99
Pohjois-etelä	9.78	12.35
Korkeus	20.71	44.30
U-blox ANN-MS		
Itä-länsi	2.69	2.56
Pohjois-etelä	7.55	5.74
Korkeus	33.55	25.03

Tämän testin perusteella nähdään, että antenneista U-bloxin varianssit olivat pienempiä jokaisessa suunnassa, paitsi korkeussuunnassa ilman aluslevyä mitattaessa. U-blox toimii loogisemmin ja sen kaikkien suuntien varianssit pienenevät aluslevyä käytettäessä, toisin kuin V.Torchin antennissa.

Ensimmäisissä RTK-paikannuskokeissa huomattiin myös, että käytettäessä näitä antenneja RTK-paikkaratkaisu katosi helposti. U-blox antennin looginen käytös aluslevyn kanssa ja yleisesti pienemmät varianssit johtivat näiden antennien käyttämiseen tukiasemassa ja roverissa.

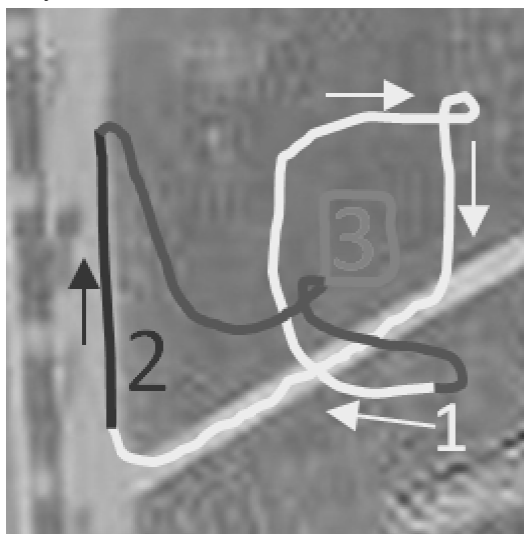
6.2 NovaTel ja U-blox antennit RTK-mittauksissa

Tässä testissä selvitettiin NovaTelin ja U-blox antennien suorituskykyä. Molempia antenneja oli kaksi kappaletta ja myös näiden antennien yhdistelmiä kokeiltiin. Testattava antenni kiinnitettiin maarobottiin. Mittaukset suoritettiin peräkkäin ja yksi mittaus kesti noin 15 minuuttia. Vastaanottimet käynnistettiin jokaisen mittauksen yhteydessä, jotta mittaukset olivat vertailukelpoisia. Vastaanottimet joutuivat hakemaan satelliitit uudelleen. Kuvassa 6.2 on esitetty testissä käytetyt laitteet.



Kuva 6.2 Maarobotti ja tukiasema.

Maarobotilla ajettiin lähes sama reitti samaa vauhtia jokaisessa antenniyhdistelmä-testissä, jotta tulokset olisivat mahdollisimman hyvin vertailtavissa. Kuvassa 6.3 on hahmoteltu testissä käytettyä rataa.



Kuva 6.3 Vertailussa käytetty testirata hahmoteltuna karttakuvan päälle.

Maarobotti lähti kuvassa numeron yksi vierestä nuolen osoittamaan suuntaan. Tämä ”vapaa ajo” oli yhtenäistä aina numeron kaksi viereen asti, jonka jälkeen maarobotilla ajettiin 10 metrin matka mittanauhan vierellä tasaisella asfaltilla. 10 metrin matka toistettiin 3 kertaa jokaisella antenniyhdistelmällä, minkä jälkeen siirryttiin numeron 3 kohdalle. Siinä maarobotilla ajettiin kolme kertaa kolme kierrosta lähes neliön mallista rataa ympäri, jonka jälkeen palattiin tukiaseman viereen. Taulukossa 6.2 on esitelty eri antenniyhdistelmien mittaustuloksia.

Taulukko 6.2 Eri antenniyhdistelmien mittaustuloksia koko mittauksen ajalta.

Suorituskyky vertailu									
Tukiaseman antenni	NovAtel		U-blox		U-blox		NovAtel		
Maarobotin antenni	NovAtel		NovAtel		U-blox		U-blox		
Satelliitteja keskimäärin (kpl)	10.32		10.37		10.77		9.93		
Hyväksymissuhde	2.46		1.09		1.12		3.79		
Keskimääräinen katkos (s)	0.94		1.37		1.18		1.86		
Pisin katkos (s)	37.65		40.9		22.6		88.45		
Fix-ratkaisuja	90	1 %	7	0 %	126	1 %	228	1 %	
Float-ratkaisuja	13041	82 %	15433	80 %	14616	67 %	7516	45 %	
Ei ratkaisua	2780	17 %	3855	20 %	7008	32 %	8964	54 %	
Näytteiden määrä	15911		19295		21750		16708		

Ensimmäisenä taulukossa on esitetty maarobotin vastaanottimen satelliittien keskimääräinen arvo koko mittauksen ajalta. Satelliittien määrät ovat hetkiltä, jolloin on saatu paikkaratkaisu. Kaikissa mittauksissa satelliitteja on ollut riittävästi. Hyväksymissuhde kuvastaa laatua, jolla paikkaratkaisu on luotettava eli fix-tyyppinen.

Kaikki antennit suoriutuivat testistä hieman odotettua huonommin. Toisaalta tuloksia on hyvä vertailla, koska olosuhteet olivat kaikille antenniyhdistelmille samat, lukuun ottamatta mittausten pientä eriaikaisuutta. Taulukon 6.2 lukujen valossa tasaisimmin suoriutui NovAtelin antennipari, joka sai myös prosentuaalisesti eniten ratkaisuja. Tämä oli sikäli odotettua, että NovAtelin antennit ovat laadultaan kokonaan eri luokassa verrattuna U-bloxin patch-antenneihin. U-bloxin antennipari toimi sikäli hyvin, että suuria katkoksia ei syntynyt ja fix-ratkaisujakin tuli prosentuaalisesti yhtä paljon kuin NovAtelin antenniparilla. NovAtelin ja U-bloxin antenniyhdistelmillä paremmin toimi antenniyhdistelmä, jossa U-bloxin antenni oli tukiasemana. Liitteissä 1-4 on esitetty maarobotin eteneminen testin aikana kaikilla antenniyhdistelmillä.

Liitteessä 1 on NovAtel-antenniparin reitti. Nähdään, että hetkittäin paikkaratkaisu on erittäin tarkka, mutta välillä paikkaratkaisu häviää tai muuttuu selkeästi kohinaisemmaksi. Testin toisen osuuden paikkaratkaisuista nähdään float-ratkaisujen ongelma. Vaikka paikkaratkaisu on tarkkaa, se saattaa hypätä useita metrejä. Hyppäyksen syy voi olla esimerkiksi cycle-slip tai yhden satelliitin signaalin hukkaaminen nopean liikkeen seurauksena. Liitteessä 2 olevassa kuvaajassa on U-bloxin antenni tukiasemana ja NovAtelin antenni roverina. Yleisesti nähdään, että kohinaa on huomattavasti vähemmän, mutta silti paikkaratkaisu ei ole luotettava koska kolmannella osuudella ratakierrokset ovat valuneet sivuun.

Liitteessä 3 on U-blox antenniparin kuvaaja. Ensimmäinen osuus on selvästi erotettavissa vaikka siinä näkyy kaksi pitkähköä katkosta. Kolmannella osuudella paikkaratkaisu on katkeillut hyvin paljon, eikä yhtään ehjää kierrosta ole syntynyt. Muutamat yhtenäiset ajolinjat on erotettavissa, mutta nekin ovat eri paikoissa. Liitteessä 4 on antennipari, jossa NovAtelin antenni on tukiasemana. Kuvaajasta nähdään, että mittauksessa on pitkiä katkoksia. Toisen ja kolmannen osuuden reitit eivät erotu.

Testin toisella osuudella oli tarkoituksena verrata maarobotin odometriasta saatua etäisyystietoa RTK-GPS:llä mitattuun etäisyyteen. Mittauksessa pysähdyttiin mittauksen alussa ja lopussa, jotta alku- ja loppupisteet pystyttiin erottamaan. Kuvassa 6.4 on maarobotti mittanauhan vierellä.



Kuva 6.4 Maarobotti mittanauhan vierellä testin toisella osuudella.

Mittanauhan avulla maarobotti lähti noin 10 cm tarkkuudella samasta pisteestä ja pysähtyi noin 15 cm tarkkuudella samaan pisteeseen. Etäisyyden arviointiin ei käytetty mittanauhaa, vaan maarobotin mittaamaa odometriatietoa. Jokaisella antenniparilla ajettiin 10 metrin matka kolme kertaa. Taulukossa 6.3 on esitelty eri antenniparien tulokset testin toiselta osuudelta.

Taulukko 6.3 Testin tulokset mittauksen toiselta osuudelta.

Tukiase- man anten- ni	Robotin antenni		1. mittaus (m)	2. mittaus (m)	3. mittaus (m)
NovAtel	NovAtel	Odometria	10.276	10.266	10.265
		RTK-GPS	8.436 *	11.553 *	9.913
U-blox	NovAtel	Odometria	10.184	10.241	10.210
		RTK-GPS	14.191	81.452 **	0.994 *
U-blox	U-blox	Odometria	10.208	10.230	10.134
		RTK-GPS	4.725	17.519	18.970
NovAtel	U-blox	Odometria	10.184	10.241	10.210
		RTK-GPS	13.155	8.032	8.197

* Hyppäys sijainnissa kesken mittauksia

** Yli 70 metrin hyppäys sijainnissa kesken mittauksia

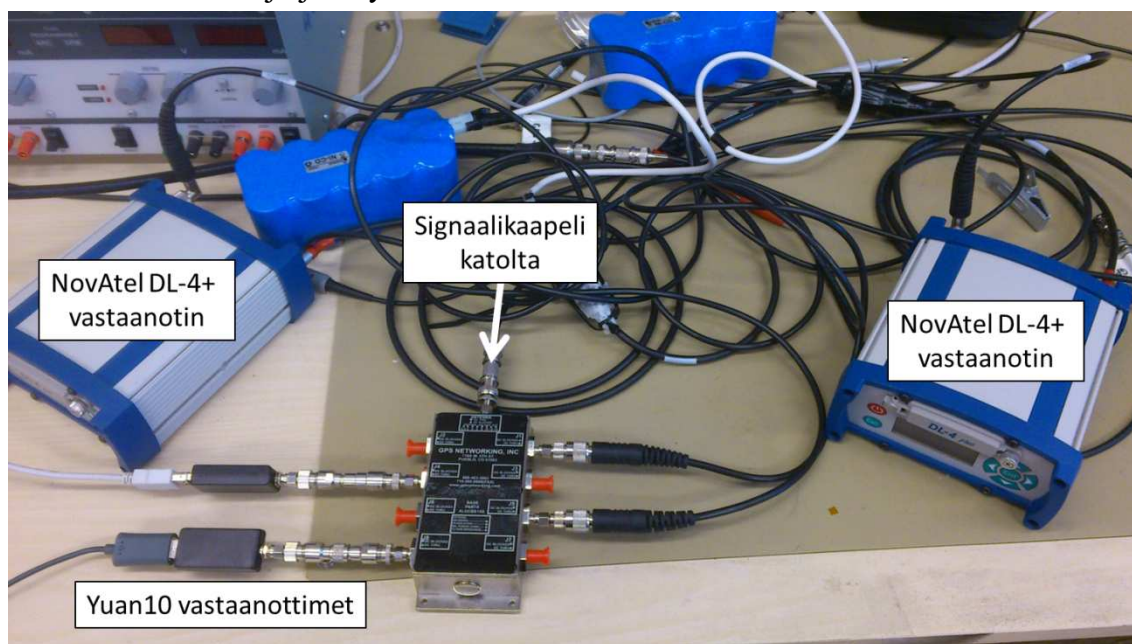
Toisen osuuden lähes kaikki mittaukset poikkeavat referenssiarvosta huomattavan paljon. Ainut selkeä yhtenäinen mittaus oli NovAtel antenniparin 3.mittaus, jolla päästiin

lähelle tavoiteltua 10 metrin matkaa. Lisäksi näiden antennien mittaukset olivat lähimpänä toisiaan. Muiden antenniparien mittaustulokset ovat yksittäisen GPS-vastaanottimen tasoa, ellei jopa huonompia. Mahdollinen syy testin huonoihin tuloksiin on Yuan10-vastaanottimien sisäisessä kellossa. Sisäisen kellon toiminnasta on kerrottu enemmän osiossa 6.3.

Paikkaratkaisujen huonot tulokset johtuvat suurelta osin vastaanottimen kyvystä suoriutua testiympäristössä. Testiympäristö pyrittiin kuitenkin valitsemaan siten, että heijastuksia ei syntyisi ja taivasnäkymä antennille olisi mahdollisimman laaja. Luultavasti esimerkiksi tukiaseman antennin nostaminen korkeammalle kuin maantasol, olisi saattanut parantaa tuloksia.

6.3 Vastaanottimen kohinan määrittäminen

Vastaanottimen sisäisen kohinan aiheuttama virhe on varsin pieni verrattuna muihin virhelähteisiin, eikä se siten suuresti vaikuta kokonaisvirheeseen. Diplomityön edetessä tarjoutui mahdollisuus mitata vastaanottimien sisäistä kohinaa. Yuan10-vastaanottimien kohinaa tutkittiin Tampereen Teknillisen Yliopiston Tietokonetekniikan laboratoriossa tehdyissä mittauksissa. Laboratorioon tulee katolle kiinteästi asennetulta GPS-antennilta signaalikaapeli. Signaalikaapeli jaettiin jakajan (eng. splitter) avulla vastaanottimille. Kuvassa 7.5 mittausjärjestely.



Kuva 6.5 Mittausjärjestely vastaanottimen kohinan määrittämiseksi.

Jakajaan kytkettiin myös kaksi NovAtel-valmistajan DL-4+ GPS-vastaanotinta, joilla saatiin hyvä referenssiarvo parempi laatuisen vastaanottimen kohinasta. Mittaukset aloitettiin lähes samanaikaisesti. Yuan10-vastaanottimilla mittaus kesti noin 28 minuuttia ja NovAtel-vastaanottimilla noin 20 minuuttia.

Kuvassa 2.11 oleva satelliittien taivasnäkymä on piirretty tämän mittauksen datasta. Kaksoisdifferenssin satelliittipari valittiin satelliiteista, jotka olivat mahdollisimman

lähellä zeniittiä, jotta signaalit olisivat mahdollisimman vähän viivästyneitä ja vääristyneitä. Satelliiteiksi valittiin satelliitit numero 7 ja 8. Yhtälön 3.13 mukaisesti mittaustuloksissa vaihemittaukset näiltä satelliitilta on vähennetty toisistaan, jonka jälkeen kahden samanlaisen vastaanottimen mittaukset on vähennetty toisistaan.

Liitteessä 5 on NovAtel DL-4+ vastaanottimien kaksoisdifferenssi. Ylimmässä kuvaajassa on koko mittaus ja kahdessa alemmassa kuvaajassa mittaus lähempää kuvattuna. Keskimmäisestä kuvaajasta nähdään, että vastaanotin on alussa lukkiutunut kantoaallon kokonaislukuun -4. Tämän jälkeen tapahtuu katkos, jonka jälkeen vastaanotin lukittuu kantoaallon kokonaislukuun -2886350. Varianssi aikavälillä 0-400 on 0,00868 sykliä, joka GPS L1-taajuuden aallonpituudella (19,029 cm) kerrottuna vastaa matkana 0,165 cm. Hyppäyksen jälkeisellä osuudella varianssi on määrittystarkkuuden rajoissa sama, 0,163 cm. NovAtel-vastaanottimien sisäisestä kohinasta johtuva virhe etäisyysmittauksiin on siis alle 0,2 cm.

Liitteessä 6 on Yuan10-vastaanottimien kaksoisdifferenssi. Keskimmäisestä kuvaajasta nähdään, että vastaanottimen käynnistymisen jälkeen tapahtuu kokonaisen ja puolikkaan kantoaallon hyppäyksiä. Sen jälkeen kaksoisdifferenssi kasvaa lineaarisesti noin 330 sekuntiin asti jonka jälkeen tapahtuu useamman kantoaaltoisyklin hyppäys. Alimassa kuvaajassa on hyppäyksen jälkeinen osuus, joka on hieman kaareva. Aikavälillä 32-325 sekuntia varianssi on 0,151 sykliä eli 2,882 cm. Aikavälillä 326-1472 sekuntia varianssi on hieman pienempi, 2,066 cm. Yuan10-vastaanottimien sisäinen kohina on siis alle 3 cm. Kohina on suhteessa NovAtelin-vastaanottimien kohinaan kuitenkin parhaimmillaankin yli 10-kertainen.

NovAtelin vastaanotinparin mittaustulos kuvastaa sitä, miltä kaksoisdifferenssi parhaimmillaan voi olla. Mittauksessa ei tapahtunut kokonaisen tai puolikkaan kantoaallon hyppäyksiä. Lisäksi vastaanotin pysyi yhtenäisesti lukittuneena yhteen kokonaislukuun. Suuremman kokonaislukuhyppäyksen voidaan olettaa olleen vastaanottimesta riippumaton, koska se tapahtui myös Yuan10-vastaanottimilla.

Tämä selkeä hyppäys oli Yuan10-vastaanottimilla noin 150 sykliä, kun taas NovAtel-vastaanottimilla hyppäys on lähes 3 miljoonaa sykliä. Hyppäyksen suuruudella ei kuitenkaan ole merkitystä, koska vaihemittaus kertoo kantoaaltojen määrän *satunnaisesti* ajanhetkestä eteenpäin. Hyppäys voi johtua monesta eri asiasta. Toisen satelliitin ja antennin väliselle näköakselille on voinut tulla jokin este hetkellisesti, jolloin vastaanottimet ovat menettäneet lukituksen satelliittiin. Toinen vaihtoehto on, että jokin lähistöllä oleva radiolähetin on hetkellisesti häirinnyt mittausta vastaanottotaajuudella.

Edullisissa vastaanottimissa, kuten Yuan10, sisäinen oskillaattori on heikkolaatuinen, mikä johtaa kellobiaksen kasvamiseen. Lisäksi tällaisen oskillaattorin stabiilisuus on myös heikkoa tasoa. Vastaanottimissa kellobiasta ohjataan tyypillisesti joko jatkuvan ohjauksen menetelmällä (eng. continuous steering method) tai kellon-hyppäysmenetelmällä (eng. clock jumping method). NovAtelin DL-4+ vastaanottimessa käytetään jatkuvan ohjauksen menetelmää, jolloin kellobias ei pääse kasvamaan suureksi, eikä kantoaallon lukitukseen muuttumaan. Yuan10-vastaanottimella todennäköisesti käytetään kellon-hyppäysmenetelmää, koska se vaatii vähemmän rautatason toteutusta

ja on siten edullisempi. Hee-Sung Kim ja Hyung-Keun Lee toteavatkin julkaisussaan (käännetty):

”Jos heikkolaatuista kideoskillaattoria käytetään aikareferenssinä GPS-vastaanottimessa, kellobias kasvaa nopeasti oskillaattorin heikon tarkkuuden ja huonon stabiilisuuden takia. – – Ennalta harkitsemattomat ja odottamattomat muutokset kellobiaksessa ja aika-erossa aiheuttavat suhteellisessa paikannuksessa huomattavan alenemisen tarkkuudessa.” (Kim, Lee 2012)

Oletus, että kellobias on kaikille vastaanottimen kanaville sama ja kumoutuisi kaksoisdifferenssissä, ei ainakaan tässä mittauksessa pidä paikkaansa. Yuan10-vastaanottimien kaksoisdifferenssissä oleva epälineaarinen aikariippuvuus on samantyyppinen, mitä Kim ja Lee ovat artikkelissaan kuvanneet (Kim, Lee 2012). Kellobiasta seurataan jatkuvasti vastaanottimessa, mutta sitä ei korjata ennen määriteltyä raja-arvoa. NovAtelin vastaanottimissa kellobiasta ohjataan jatkuvasti, mikä näkyy mittaustuloksissa pienempänä varianssina ja kantoaaltohyppyjen poissaolona.

6.4 Kohteen koordinaattien tarkkuus

Kohteen koordinaattien määrittämiseksi tarvitaan mittaukset inertia-antureilta, magnetometriltä, barometriltä, RTK-GPS vastaanottimelta ja kameralta. Inertia-antureilla saadaan huomioitua kuvausalueen kallistuma kuvanottohetkellä, magnetometrin avulla koordinaatit saadaan kierrettyä lokaalista ENU-koordinaatistosta WGS84-koordinaatistoon ja barometrillä saadaan tarkempi arvio korkeudesta kuin mitä RTK-GPS pystyy mittaamaan.

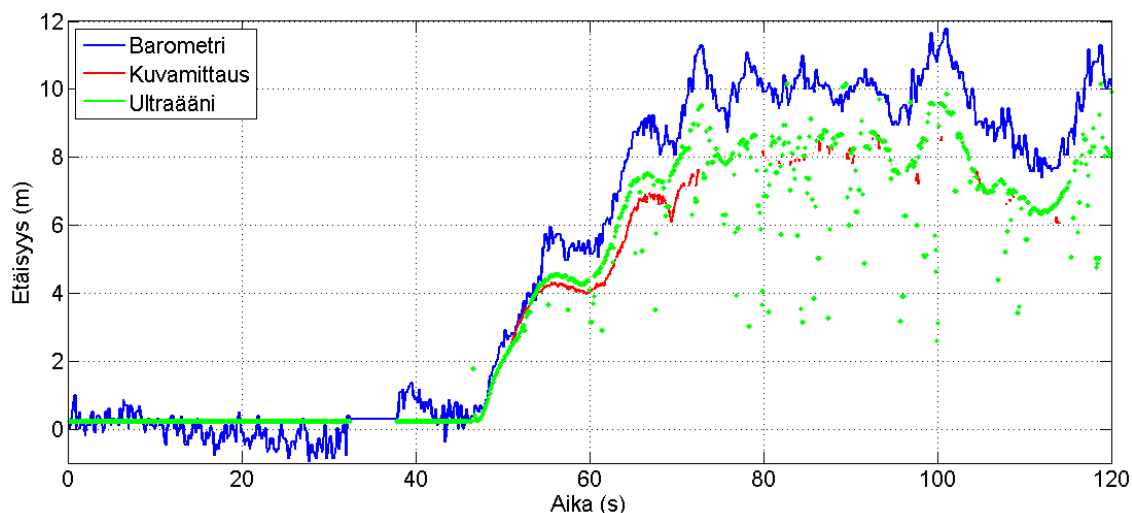
Mittauksissa oli ongelmana synkronoida anturimittaukset keskenään. RTK-GPS vastaanottimen sijainnin määrittäystä ei saatu maatestien perusteella tehdystä kehitystyöstä huolimatta riittävän tarkaksi lentävässä kuvausalueessa. Tämän takia seuraavassa on keskitytty erottelemaan eri antureista aiheutuvaa virhettä kohteen sijainnin tarkkuuteen. Taulukossa 6.4 on esitelty mitattuja arvoja lyhyistä kuvasarjoista, joissa kamera ja kohde olivat tunnetulla etäisyydellä toisistaan. Käytetty resoluutio oli 640*360 pikseliä.

Taulukko 6.4 Kuvamittauksen ja kuvausalustan antureiden aiheuttamat virheet.

Mittaus	Kohteen etäisyys 5 metriä	Kohteen etäisyys 10 metriä	Kohteen etäisyys 20 metriä
Kohteen halkaisija (keskiarvo)	18,3 pikseliä	8,8 pikseliä	4,6 pikseliä
Kohteen keskipisteen vaihteluväli vaaka- suunnassa	0,27 pikseliä / 2,4 mm	0,16 pikseliä / 2,9 mm	0,80 pikseliä / 290 mm
Kohteen keskipisteen vaihteluväli pysty- suunnassa	0,25 pikseliä / 3,9 mm	0,21 pikseliä / 6,9 mm	0,89 pikseliä / 57 mm
Etäisyysmittauksen vaihteluväli	0,19 m	0,69 m	10,40 m
Kuvausalustan roll- suunnan vaihteluväli	1,5 mrad / 7,6 mm	<i>sama</i> / 15,2 mm	<i>sama</i> / 30,5 mm
Kuvausalustan pitch- suunnan vaihteluväli	2,3 mrad / 11,6 mm	<i>sama</i> / 23,3 mm	<i>sama</i> / 46,5 mm
Kuvausalustan yaw- suunnan vaihteluväli (janteen pituus)	17 mrad / 85 mm	<i>sama</i> / 170 mm	<i>sama</i> / 340 mm

Kuvamittauksesta saadut kohteen keskipisteen vaihteluvälit on laskettu minimi ja maksimi-arvon erotuksena. Ne on edelleen muutettu kulmayksikköön, kun tiedetään käytetyn kameran katselukulman olevan 78° suhteessa diagonaaliakseliin. Kulman avulla on laskettu vaihteluväli matkana kolmella esimerkkietäisyydellä. Kuvausalustan inertia-antureiden kohinasta aiheutuva vaihteluväli on laskettu vastaavasti. Kuvausalustan yaw-suunnan vaihteluväli esimerkkietäisyyksillä on laskettu ympyrän janteen pituutena, kun kohteen etäisyys on ympyrän säteenä.

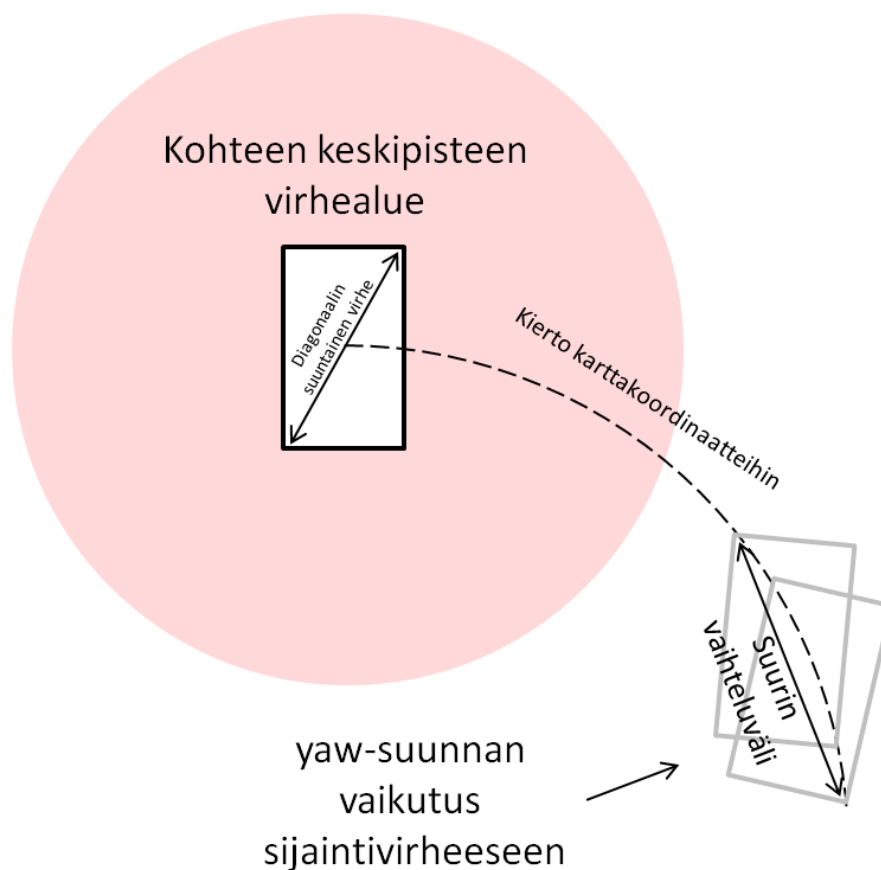
Etäisyysmittauksen vaihteluväli on 5 ja 10 metrin etäisyyksillä riittävän pieni useisiin käytännön sovelluksiin, mutta 20 metrin etäisyydeltä etäisyyden määrittäminen epäonnistui, sillä ellipsiä sovitetaan täysin vääriin pikseleihin. Siitä aiheutuu hyvin suuri vaihteluväli ja voidaankin todeta, ettei etäisyysmittaus ole enää luotettava. Kuvassa 6.6 on esitetty testilennolta kuvamittauksesta saatu etäisyys, barometrin mittaama korkeus ja ultraäänianturin mittaama korkeus. Kuvamittauksesta saatu etäisyys alkaa niiltä hetkiltä, jolloin kohde on ilmestynyt kuvaan eli hieman ilmaan nousun jälkeen. Kuvien-resoluutio on 640*360 pikseliä.



Kuva 6.6 Kuvamittauksesta määritetty etäisyys kohteeseen, sekä barometrin ja ultraäänianturin mittaama korkeus.

Kaikkia mittaukset on suodatettu laskemalla kolmen perättäisen näytteen keskiarvo. Edellä mainitun synkronointiongelman takia kuvamittauksen etäisyysarvo on kohdistettu ja skaalattu aika-akselilla. Skaalaus on tehty kertoimella 1,4 jolloin se on barometrin ja ultraäänianturin mittausten kanssa suurin piirtein samanaikainen. Mittausten aika-leimojen eriaikaisuus johtuu luultavasti tallentumattomista kuvista. Kuvamittauksista nähdään, että kuvamittaus ei ole onnistunut luotettavasti jos korkeus ylittää hieman alle 10 metriä. Vaikka taulukon 6.4 tuloksista nähdään, että 10 metrin etäisyydellä etäisyyden vaihteluväli oli melko pieni, testilennon mittauksissa on vaikuttanut myös tärinä, joka on heikentänyt kuvamittausten tuloksia. Testilennon datasta on jätetty pois epäluotettava data, jonka ehtona oli, että ellipsin katselukulman tulee olla välillä $0-45^\circ$. Suoraan ylhäältä katsottuna katselukulma on 0° . Tämän takia kuvamittauksen kuvaaja ei ole yhtenäinen. Barometrin mittaama paine on muutettu metriseksi yksiköksi tavalla, jolla se on implementoitu kuvausalan ohjauksessa ja siinä on pientä poikkeamaa verrattuna kahteen muuhun mittaustapaan. Ultraäänianturin maksimikantomatka on noin 8 metriä, jonka ylittäminen näkyy virheellisinä mittauksina. Katkos mittauksissa noin 30 sekunnin kohdalla johtuu lentoelektroniikan uudelleenkalibroinnista, jolloin määritetään inertia-antureilla maatasen suunta ennen ilmaan nousua.

Kameran ollessa suunnattuna suoraan alaspäin kohteen keskipisteen vaaka-suunta ja kuvausalan roll-suunta ovat yhdensuuntaisia. Vastaavasti kohteen keskipisteen pystysuunta ja kuvausalan pitch-suunta ovat yhdensuuntaisia. Kuvassa 6.7 on hahmoteltu kuvamittauksen ja inertia-antureiden aiheuttamien virheiden vaikutusta kohteen keskipisteen lopulliseen sijaintitarkkuuteen.



Kuva 6.7 Hahmotelma virheiden yhteisvaikutuksesta.

Taulukon 6.5 tulokset ovat yhteenvedo taulukon 6.4 arvoista. Kaikki kuvamittausarvot ovat tilanteesta, jossa kohde on täysin kohtasuorassa kameraan nähden keskellä kuvaa.

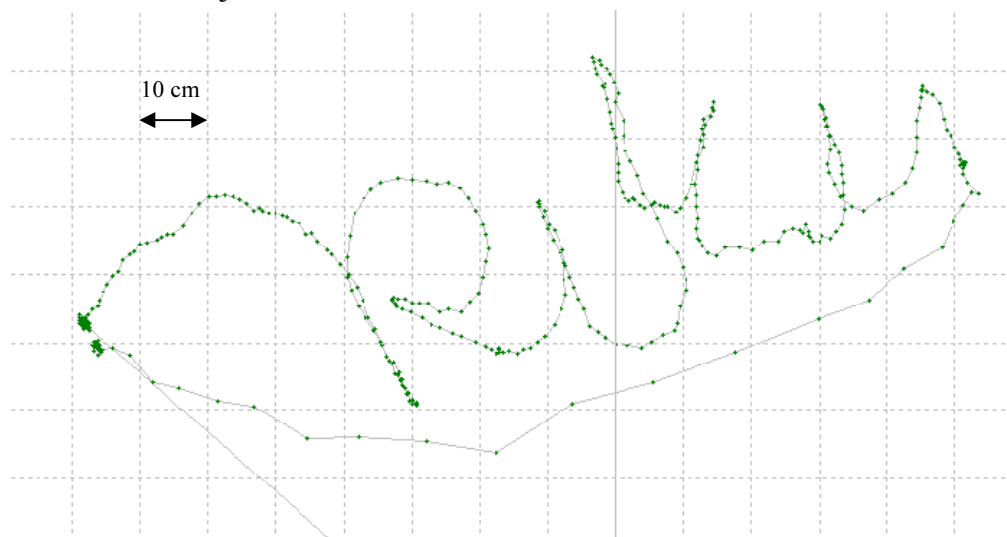
Taulukko 6.5 Inertia-antureiden, kuvamittauksen ja magnetometrin vaihteluvälien summat.

Mittaus	Kohteen etäisyys 5 m	Kohteen etäisyys 10 m	Kohteen etäisyys 20 m
Vaaka-suuntainen (kuvamittaus+inertia)	1,0 cm	1,8 cm	5,9 cm
Pysty-suuntainen (kuvamittaus+inertia)	1,6 cm	3,0 cm	10,4 cm
Diagonaalinen suuntainen (kuvamittaus+inertia)	1,9 cm	3,5 cm	11,9 cm
Yaw-suunnan vaihteluväli	8,5 cm	17,0 cm	34,0 cm
Kohteen keskipisteen suurin vaihteluväli	10,4 cm	20,5 cm	45,9 cm

Kohteen keskipisteen suurin vaihteluväli on vain suuntaa antava tulos järjestelmän suorituskyvystä, koska huomioimatta jää esimerkiksi El-Sheimyn mallin rotaatiomatriisi R_c^b , joka kuvaa kameran ja inertia-antureiden välisen rotaation. Rotaatiomatriisin R_c^b tarkka määrittäminen vaatii kalibroinnin, jota ei näissä mittauksissa tehty. Myöskään kuvien vääristymiä ei korjattu.

Myönteisenä tuloksena noin 10 pikseliä halkaisijaltaan oleva kohde oli mitattavissa kuvasta, kun sen ympärillä on riittävästi sinistä kontrastialuetta. Mitattavaa etäisyysaluetta voidaan kasvattaa suurentamalla pikseliresoluutiota, suurentamalla kohdetta tai zoomaamalla optisesti, mikä kuitenkin lisää esimerkiksi tärinän vaikutusta epävarmuuteen.

Kohteen koordinaattien lopullinen tarkkuus riippuu kuvausalueen RTK-GPS vastaanottimen tarkkuudesta, jonka suhteen kohteen sijainti määritetään. Testeissä RTK-GPS vastaanottimella päästiin *hetkittäin* selvästi alle 10 cm suhteelliseen tarkkuuteen, mutta sijainnin luotettavuus vaihteli hyvin paljon. Kuvassa 6.8 on piirretty 10 Hz taajuudella tallennettu sijainti, kun antennia on liikuteltu kädessä.



Kuva 6.8 RTK-GPS tarkkuus parhaimmillaan U-blox ANN-MS antennin kanssa.

Nähdään, että ennen antennin nostamista ja laskemisen jälkeen paikannustarkkuus on ollut selvästi alle 10 cm. Huonoimmillaan RTK-GPS vastaanottimen tuottama sijaintitieto oli käyttökeltontonta, mikä on nähtävissä myös liitteissä 1-4. RTK-GPS on suhteellinen paikannusmenetelmä, jolloin käytetyn tukiaseman sijainnin tarkkuus vaikuttaa suoraan kuvamittauksella mitatun kohteen koordinaattien tarkkuuteen.

7 YHTEENVETO

Tässä diplomityössä etsittiin menetelmää koordinaattien määrittämiseksi ilma-aluksesta otetusta kuvasta mitatulle kohteelle. Lähtökohtana oli ensin löytää riittävän tarkka paikannusmenetelmä kuvausalustalle. Menetelmäksi valittiin avoimeen lähdekoodiin perustuva RTKLIB-ohjelmisto. GPS-vastaanotin valittiin ohjelmiston tukemien vastaanottimien listalta. Sopivan GPS-antennin valitsemiseksi tehtiin pienimuotoinen testi, jonka perusteella valittiin suorituskyky/paino-suhteeltaan paras antenni. Kuvamittauksen pääkomponenttianalyysi vaikutti kohteen suunnitteluun. Kohteeksi valittiin kuvasta helposti löydettävissä ja mitattavissa oleva punainen ympyrä sinisellä taustalla. Värät valittiin siten, että niiden välille saatiin muodostumaan mahdollisimman selvä raja.

Työssä esitettiin lyhyesti satelliittipaikannuksen historiaa, jonka jälkeen esiteltiin GPS vastaanottimen, sekä RTK-GPS-vastaanottimien toimintaperiaate. Teoriaosuudessa esiteltiin mittaukset joita vastaanotin tekee sijainnin määrittämiseksi ja kuvamittauksen pääkomponenttianalyysin toimintaperiaate. Ennen mittaustuloksia esiteltiin testeissä käytetyt laitteet ja niiden ominaisuudet.

Mittaustulosten käsittelyssä keskityttiin mittalaitteiden virheiden arvioimiseen. Arvioinnissa selvitettiin kohteen lopullinen sijaintitarkkuus ja siihen vaikuttavat tekijät. Sekä kuvamittauksen että satelliittipaikannuksen virheet saatiin varsin pieneksi, kun otetaan huomioon työn huokeat laitteet. Tulokset olivat hetkittäin erittäin lupaavia ja kuvamittausalgoritmia on mahdollista kehittää robustimpaan suuntaan. Luotettavien mittaustulosten ohella, tulisi inertia-anturin, GPS-antennin ja kameran suhteelliset sijainnit kalibroida huolellisesti.

Autonomisten robottien välisessä paikkatietojen vaihdannassa tulee huomioida, että robotit toimivat saman tukiaseman koordinaatistossa. Tunnistetun kohteen koordinaattitietoon tulisi pystyä liittämään mittausepävarmuus, jotta toinen tietoa hyödyntävä roboti osaa huomioida sen reittisuunnittelussaan. Robotin GPS-antennin asennon vaikutus mittauksiin tulisi myös selvittää etukäteen, sillä ilmassa liikkuvan robotin asento voi hetkittäin poiketa useita kymmeniä asteita vaakatasosta.

LÄHTEET

Ali-Löytty, S., Collin, J., Leppäkoski, H., Sairo, H. & Sirola, N. MAT-45800 Paikannuksen matematiikka ja TKT-2540 Paikannuksen menetelmät. 2008. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Matematiikka, Tietokonetekniikka. Kurssimoniste. 93 s.

Bigun, J. 2006. In: Reducing the Dimension of Features. Vision with Direction: A Systematic Introduction to Image Processing and Computer Vision. , 1st edn, Springer, , pp. 329.

Blewitt, G. 1997. In: Basics of the GPS Technique: Observation Equations. Geodetic Applications of GPS. , ed. B. Johnson, Department of Geomatics, University of Newcastle edn, Nordic Geodetic Commission, Sweden, pp. 10-54.

Boeing Defense: Space & Security Global Positioning System (GPS) IIF backgrounder. 2012. Saatavissa: http://www.boeing.com/defense-space/space/gps/bkgd_gps2f_0611.pdf.

Bouguet, J. Camera Calibration Toolbox for Matlab. 2010. Saatavissa: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.

Costa, L.d.F. & Cesar, R.M. 2001. Shape analysis and classification: theory and practice. Boca Raton, FL CRC Press.

Dryden, I.L. & Mardia, K.V. 1998. Statistical shape analysis. Chichester; New York John Wiley & Sons.

El-Rabbany, A. 2002. Introduction to GPS the Global Positioning System. Boston, MA Artech House.

El-Sheimy, N. The Development of VISAT - A Mobile Survey System For GIS Applications. Dissertation. CALGARY, ALBERTA 1996. THE UNIVERSITY OF CALGARY. 198 p.

European Space Agency 2012. Galileo [WWW]. [viitattu 7.8.2012]. Saatavissa: <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>.

Golstein, D.B. Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, INTERFACE SPECIFICATION IS-GPS-200 Revision E. El Segundo, CA 90245, Science Applications International Corporation. 2010. Vol. IS-GPS-200E.

Hassan, T. & El-Sheimy, N. System calibration of land-based mobile mapping systems. International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2008, Castelldefels,

Spain, 30.01-01.02.2008. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing 2002.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E. 2008. GNSS--global navigation satellite systems : GPS, GLONASS, Galileo, and more. Wien Springer.

Japan Aerospace Exploration Agency 2010. Launch Result of the First Quasi-Zenith Satellite 'MICHIBIKI' [WWW]. [viitattu 7.8.2012]. Saatavissa: http://www.jaxa.jp/projects/sat/qzss/press_e.html

Kaplan, E.D. & Hegarty, C. 2006. Understanding GPS : principles and applications. Vol. 2nd. Boston Artech House.

Kim, H. & Lee, H. 2012, "Elimination of Clock Jump Effects in Low-Quality Differential GPS Measurements", vol. 7, no. 4, pp. 626-635.

Kirkko-Jaakkola, M. Carrier phase based techniques in personal satellite positioning. Master's thesis. Tampere 2008. Tampereen teknillinen yliopisto. 74 p.

Lahti, S. Antennisuunnittelun perusteet, ELE-2250 Johdatus suurtaajuustekniikkaan. 2008. Tampere, Elektroniikan laitos, Tampereen teknillinen yliopisto. Kurssimoniste.

Lockheed Martin Corporation 2012. U.S. Air Force Awards Lockheed Martin Contract for Third and Fourth GPS III Satellites [WWW]. [viitattu 07.05.2012]. Saatavissa: http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2012/january/0112_ss_gps.html.

Logitech 2012. Logitech HD Pro Webcam C920 [WWW]. [viitattu 19.11.2012]. Saatavissa: <http://www.logitech.com/en-us/webcam-communications/webcams/hd-pro-webcam-c920>.

Misra, P. & Enge, P. 2006. Global positioning system : signals, measurements, and performance. Lincoln, Mass. Ganga-Jamuna Press.

National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing 2012. GPS Space Segment [WWW]. [viitattu 4.7.2012]. Saatavissa: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>.

NAVCEN Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification. U.S. Coast Guard Navigation Center. 1995. Saatavissa: <http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpssps1.pdf>.

NovAtel GPS-701/702-GG Brochure. NovAtel. 2006. Saatavissa: <http://www.novatel.com/products/gnss-antennas/high-performance-gnss-antennas/>.

Onetalent GNSS 2012. Yuan10 USB receiver [WWW]. [viitattu 9.8.2012]. Saatavissa: <http://www.onetalent-gnss.com/ideas/usb-hw-receivers/yuan10>.

Rizos, C. & Han, S. Status and Trends for High Precision GPS Kinematic Positioning. 9th Australasian Remote Sensing & Photogrammetry Conf., Sydney, Australia, 20-24.7.1998. 1998. 17p.

Smith, M.S. 2011. GLONASS Constellation Complete Again After 15 Years [WWW]. [viitattu 7.8.2012]. Saatavissa: <http://www.spacepolicyonline.com/news/glonass-constellation-complete-again-after-15-years>.

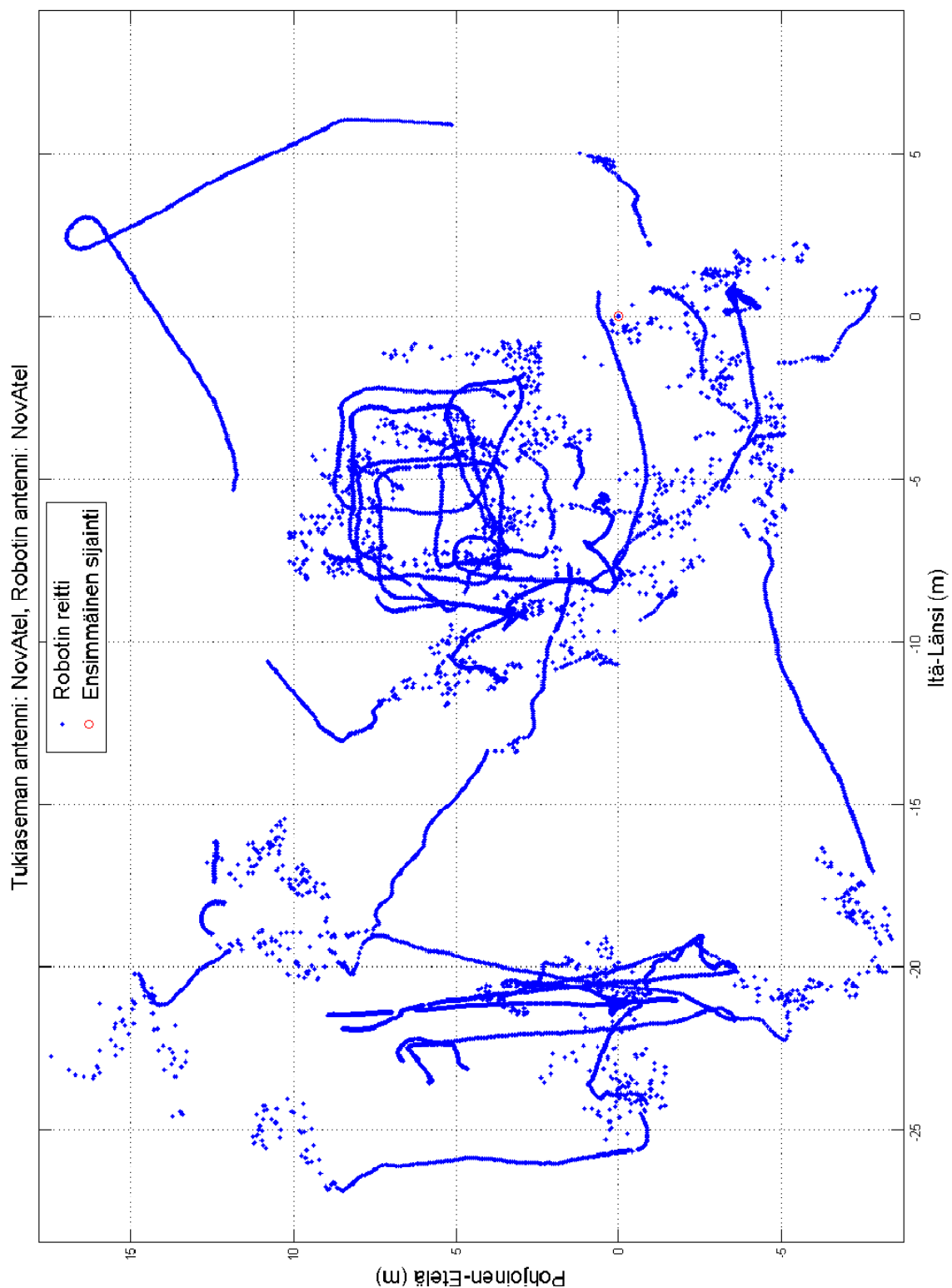
Takasu, T. & Yasuda, A. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. International Symposium on GPS/GNSS, International Convention Center Jeju, Korea, 4-6.11.2009. Laboratory of Satellite Navigation, Tokyo University of Marine Science and Technology 2009. 6p.

Teunissen, P.J.G. 1995, "The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation", Journal of Geodesy, vol. 70, no. 1-2, pp. 65-82.

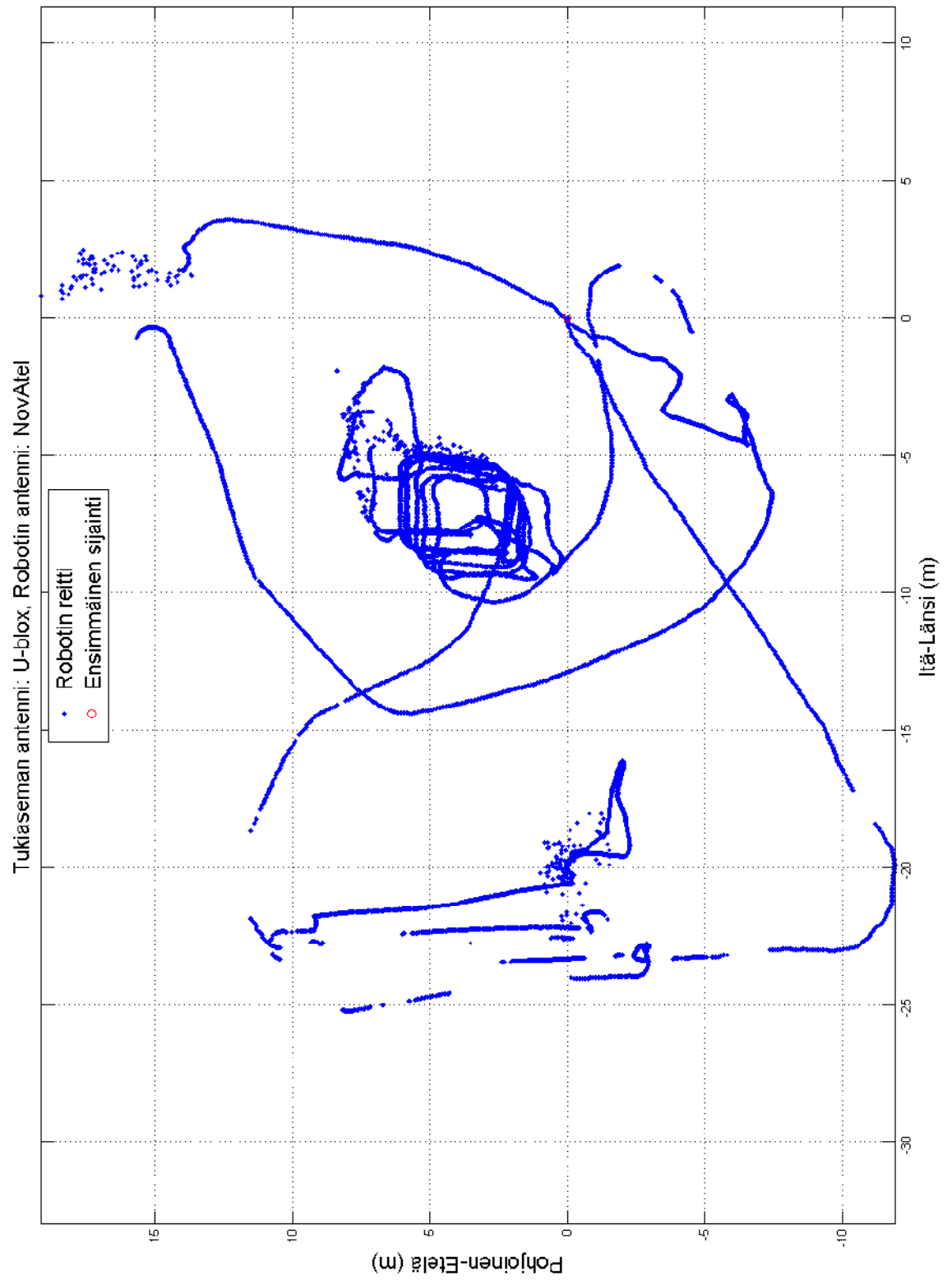
Tomić, T., Schmid, K., Lutz, P., Dömel, A., Kassecker, M., Mair, E., Grix, I.L., Ruess, F., Suppa, M. & Burschka, D. Toward a Fully Autonomous UAV. IEEE Robotic & Automation magazine. 2012. Saatavissa: <http://online.qmags.com/RAM0912?pg=21&mode=2#pg48&mode2>.

Yuen, M.F. Dilution of Precision (DOP) Calculation for Mission Planning Purposes. 2009. Naval Postgraduate School. 221 p.

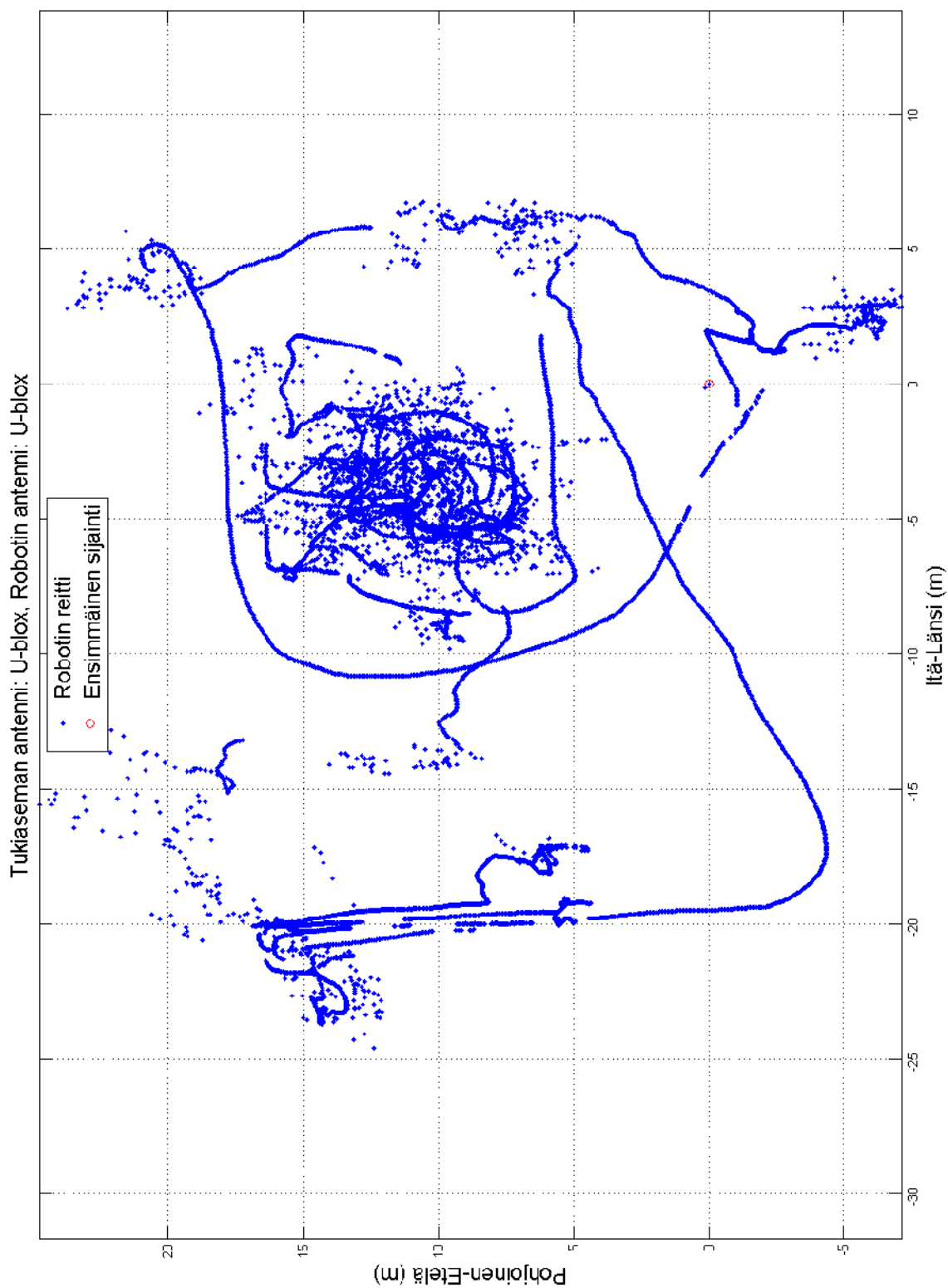
LIITE 1



LIITE 2

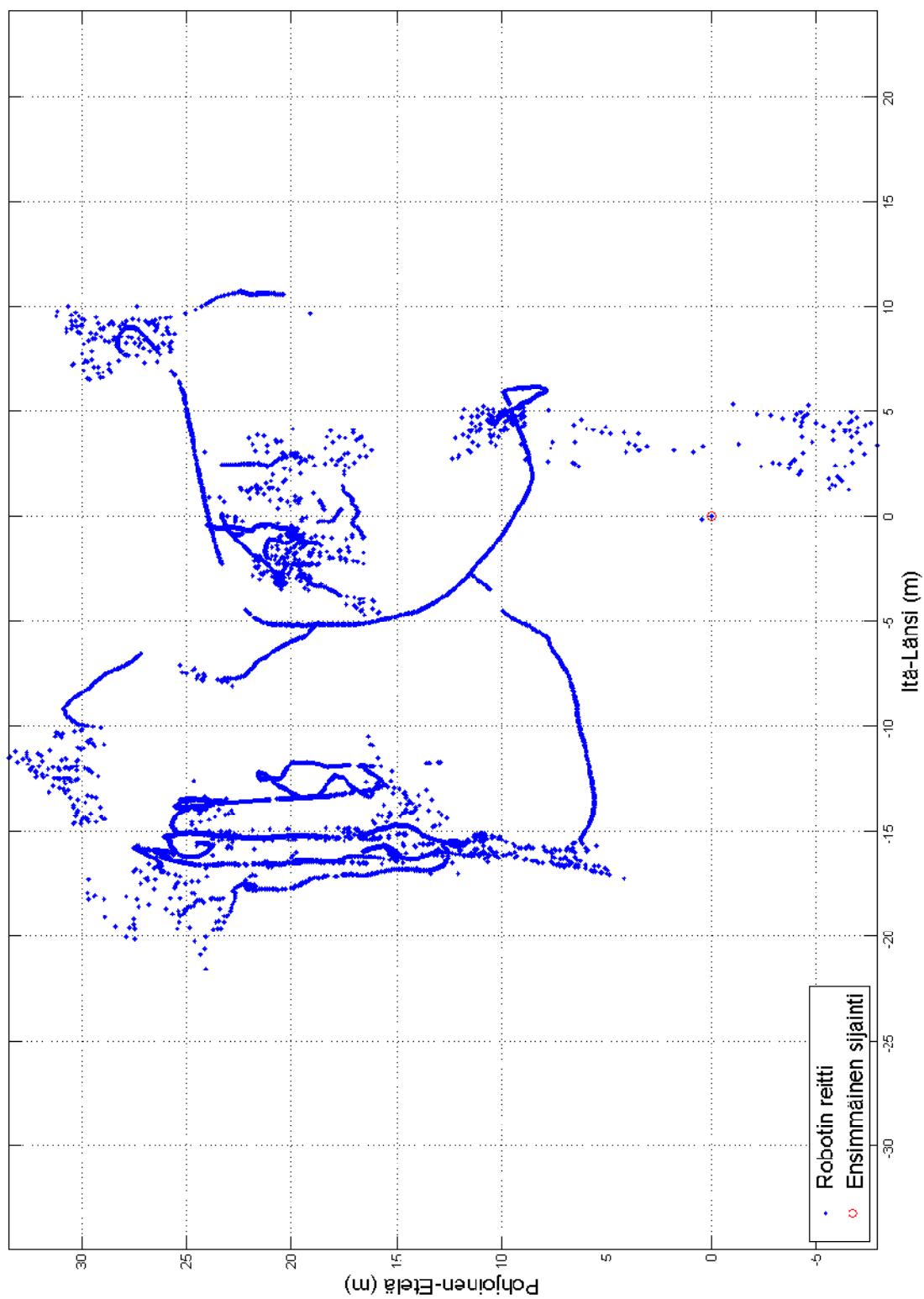


LIITE 3



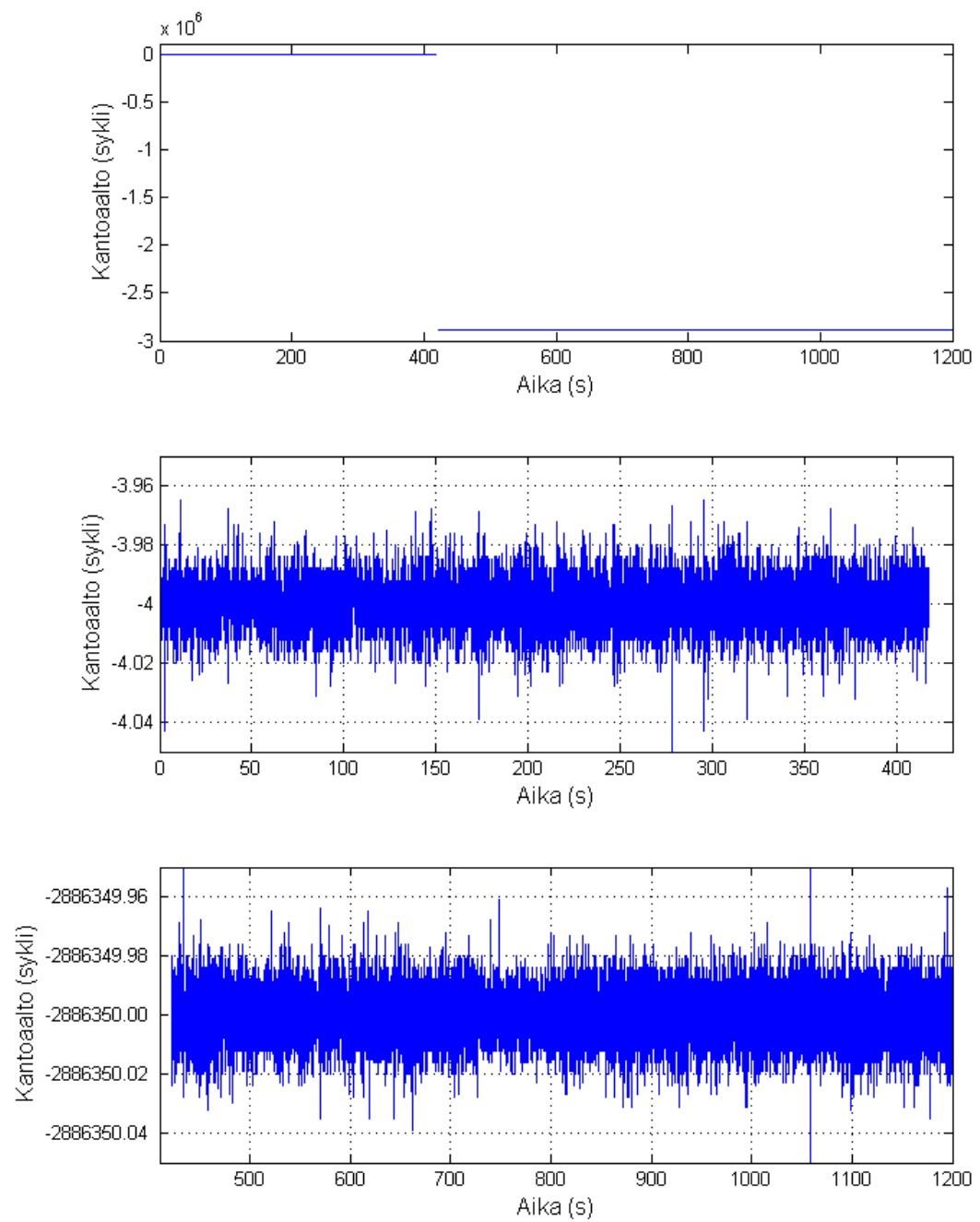
LIITE 4

Tukiaseman antenni: NovAtel, Robotin antenni: U-blox



LIITE 5

NovAtel DL-4+ vastaanottimien kaksoisdifferenssi



LIITE 6

Yuan10 vastaanottimien kaksoisdifferenssi

